INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Junio 2019 • N.º 513 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

INFORME ESPECIAL

Descifrar la gravedad

De los agujeros negros a la gravitación cuántica

NEUROTECNOLOGÍA

La máquina que puede leer nuestras intenciones

MICROBIOLOGÍA

La importancia de las simbiosis microbianas

TERREMOTOS

Señales de alerta sísmica en la ionosfera





MARK ROSS

ARTÍCULOS


8


56


57

INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

La reciente posibilidad de detectar las ondas gravitacionales generadas durante el choque de agujeros negros ha abierto un camino completamente nuevo para poner a prueba las predicciones de la relatividad general en un régimen hasta ahora inexplorado. Junto a nuevos experimentos de laboratorio y varios avances teóricos, tales hitos están ofreciendo nuevas rutas para explorar las propiedades cuánticas de la gravedad. Ilustración de Mikel Rodríguez Hidalgo.



redaccion@investigacionyciencia.es



Febrero y marzo de 2019

CORRELACIONES CUÁNTICAS

«Acción fantasmal», de Ronald Hanson y Krister Shalm [Investigación y Ciencia, febrero de 2019], habla del fenómeno del entrelazamiento cuántico, en el que dos partículas muestran una conexión «fantasmal» con independencia de la distancia que las separe.

Los autores no explican por qué no podría estar ocurriendo algo tan poco llamativo como lo siguiente: supongamos que escondo un par de guantes en sendos sobres y envío uno (sin saber cuál) a mi amigo en Marte, con una nota para que lo abra al recibirlo. Los sobres estarán ahora «entrelazados», ya que si mi amigo encuentra el guante izquierdo, yo hallaré el derecho, y viceversa, antes de que una señal luminosa haya tenido tiempo de viajar hasta la Tierra.

Gordon B. Hazen
Profesor emérito de ingeniería industrial y gestión, Universidad Noroccidental de EE.UU.

¿Es el entrelazamiento «monógamo»? Si un electrón puede estar entrelazado con otro, ¿por qué no puede estarlo con varios de manera simultánea? ¿Podría haber entrelazamiento cuántico entre un gran número de partículas con independencia de su localización? Y, en tal caso, ¿podrían estas manipularse para establecer una especie de mensajería instantánea a través de distancias interestelares?

Bob Morrison
Asheboro, Carolina del Norte

Responden los autores: *Sobre la sugerencia de Hazen cabe decir que, al igual que «correlación no implica causalidad», tampoco implica entrelazamiento. La correlación entre los guantes se determina en el momento en que se colocan en los sobres, y su análogo constituiría un ejemplo de «teoría de variables ocultas». John Bell demostró que ninguna teoría de este tipo podría exhibir correlaciones tan ricas como las que permite el entrelazamiento cuántico. En nuestros experimentos, una vez que las partículas se envían a lugares distantes, sus propiedades se miden al azar de una de dos maneras posibles. Dado que las partículas no pueden saber de antemano cómo vamos a medirlas, tampoco pueden acordar cómo correlacionar sus resultados. En apariencia, es como si medir una partícula de forma aleatoria pudiera influir en su pareja distante, de ahí el calificativo «fantasmal» usado por Einstein.*

En respuesta a Morrison: Es posible entrelazar múltiples partículas entre sí; esto constituye una activa área de investigación para, por ejemplo, diseñar ordenadores cuánticos. Pero el entrelazamiento tiene grados, y si dos partículas están máximamente entrelazadas, entonces no pueden estarlo con una tercera. En ese sentido, el entrelazamiento es monógamo. En las comunicaciones cuánticas, ello garantiza un nivel de privacidad imposible de lograr en física clásica y constituye un aspecto clave de las aplicaciones cuánticas a la comunicación segura.

Por desgracia, la comunicación a velocidades mayores que la de la luz seguirá relegada al ámbito de la ciencia ficción. En el entrelazamiento, los resultados de las mediciones están correlacionados, pero son aleatorios. Supongamos que usted y un amigo lejano comparten un par de electrones entrelazados y acuerdan que, si una medida del espín arroja el resultado «arriba», eso significa «sí», mientras que «abajo» significa «no». Su amigo siempre va a obtener el mismo resultado que usted, por lo que parecería que los electrones se han influido de manera instantánea. Sin embargo, no hay manera de que usted fuerce a su electrón a que dé el resultado «arriba» para enviar a su amigo el mensaje «sí». Cuando efectúa la medida, es el electrón —no usted— el que «decide» el resultado con una probabilidad del 50 por ciento, por lo que el método no funcionaría mejor que lanzar una moneda al aire.

GAIA Y LA MATERIA OSCURA

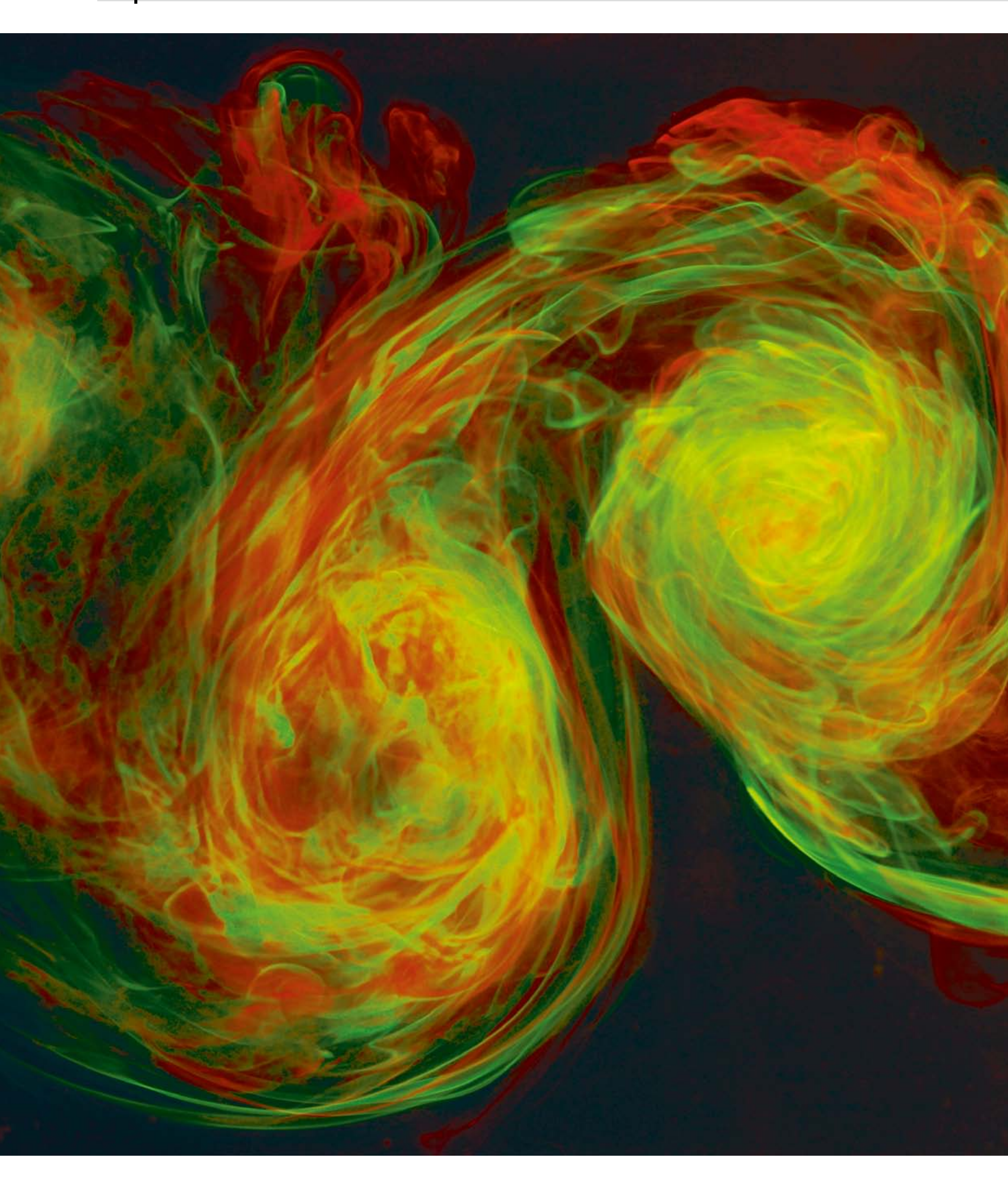
En el artículo de Carme Jordi y Eduard Masana sobre la misión Gaia [«El primer mapa 3D de la Vía Láctea»; Investigación y Ciencia, marzo de 2019] se habla de simulaciones que son compatibles con un encuentro hace 10.000 millones de años entre la Vía Láctea y otra galaxia, Gaia-Encélado, así como de otro encuentro con una galaxia enana, Sagitario, hace 500 millones de años.

El artículo no menciona en ningún momento la materia oscura. ¿Es necesario suponer su existencia para dar coherencia a dichos análisis? ¿O, por el contrario, se está revelando superflua tal hipótesis?

Javier Merinero
Madrid

Responden los autores: *Las simulaciones de los encuentros de la Vía Láctea con otras galaxias sí tienen en cuenta la presencia de un halo de materia oscura alrededor de nuestra galaxia. La distribución de materia oscura se asume sobre la base de datos anteriores a los proporcionados por la misión Gaia; en particular, los relacionados con la curva de rotación de la Vía Láctea (la velocidad a la que giran las estrellas alrededor del centro galáctico en función de su distancia a él). Para poder explicar la forma de esta curva de rotación, es necesario suponer la presencia de materia oscura.*

De todas formas, cabe señalar que las simulaciones que se mencionan en nuestro artículo dependen poco de la distribución de materia oscura, puesto que se trata de estrellas que ocupan un volumen reducido de la galaxia. Por ello, tampoco aportan demasiada información sobre ella. Otros estudios con datos de Gaia publicados recientemente (después de la aparición de nuestro artículo en Investigación y Ciencia*) están sugiriendo la posibilidad de que su distribución no sea tan uniforme como se asumía hasta ahora.*






UN ALA NO ÓPTIMA genera vórtices (*rojo*) en su borde de ataque, o delantero, los cuales interfieren con los producidos en el borde de salida, o posterior (*verde*).

LEIF RISTROPH/LABORATORIO DE MATEMÁTICAS APLICADAS/INSTITUTO COURANT DE CIENCIAS MATEMÁTICAS/UNIVERSIDAD DE NUEVA YORK

BIOMECÁNICA

Simular la evolución

Un algoritmo evolutivo permite encontrar la forma óptima para un ala

Hace tiempo que los ingenieros se inspiran en las alas de las aves para diseñar sus análogos mecánicos. Ahora, un equipo de matemáticos ha dado un paso más allá. Tras imprimir en 3D alas con formas diferentes, los investigadores comprobaron sus prestaciones en el laboratorio e introdujeron los datos en un algoritmo que simulaba la evolución. Al hacerlo, hallaron que un ala con forma de lágrima era la más rápida tanto para el vuelo activo (con batido de alas) como para el nado. Se trata de la primera vez que se emplea un proceso combinado de este tipo para encontrar la forma óptima de un ala para el vuelo rápido, comenta Leif Ristroph, matemático del Instituto Courant de Ciencias Matemáticas de la Universidad de Nueva York y autor principal del nuevo estudio.

El resultado se explica gracias a algunas de las peculiaridades de la geometría con forma de lágrima, explica Ristroph, en particular su asimetría anteroposterior. Esta se caracteriza por presentar un borde delantero redondeado, cerca del cual se encuentra el punto de mayor grosor del ala, y un borde posterior muy fino, semejante al del ala de un ave, que habitualmente se reduce a una sola pluma. El hallazgo sugiere que las alas de las aves han evolucionado para ser lo más delgadas posible, afirman los investigadores en su artículo, publicado en enero en *Proceedings of the Royal Society A*.

Ristroph y sus colaboradores imprimieron en 3D una primera «generación» de diez alas de plástico. Después fijaron cada una a una barra horizontal impulsada por un motor que la hacía aletear arriba y abajo en el agua. Gracias a ello midieron su velocidad de nado, a partir de la cual extrapolaron la de vuelo. Probaron diversas formas; entre ellas, algunas basadas en alas de avión tradicionales, esferas aplanadas y una estructura similar a un cacahuete, apunta Ristroph.

Los investigadores introdujeron los datos de velocidad en el algoritmo evolutivo, lo que produjo una segunda generación de ocho alas «hijas». Y aunque las más rápidas tenían mayor probabilidad de pasar a la siguiente generación, el algoritmo también permitía «mutaciones» que podían generar nuevas formas. Además, las dos alas más rápidas de la primera generación también se añadieron a la segunda, tras lo cual se repitió todo el proceso de impresión en 3D y pruebas de laboratorio con esa segunda generación de diez alas. En total, los investigadores crearon quince generaciones. El ala más rápida (la que tenía forma de lágrima) apareció en la undécima generación y persistió en las siguientes. Los intentos del algoritmo por mejorar esta forma dieron como resultado alas demasiado delgadas para imprimirlas en 3D.

El estudio es «tremendamente interesante», afirma Geoffrey Spedding, ingeniero aeroespacial de la Universidad del Sur de California que no participó en el trabajo. El experto señala que el ala óptima «se parece más a una aleta de pez», lo que la hace más adecuada para nadar o impulsar objetos hacia delante que para generar la sustentación en la que se basa el vuelo de los aviones.

—Rachel Crowell

TECNOLOGÍA AMBIENTAL

Hacia la Internet de las plantas

Un sistema sencillo y económico convierte los limones en «estaciones de radio» que indican cuándo el árbol necesita que lo rieguen

Un equipo de investigadores en Grecia acaba de descubrir una manera de tornar los limones en pequeñas «estaciones de radio» capaces de transmitir a un teléfono inteligente información sobre el grado de humedad de los árboles. El logro constituye un primer paso hacia lo que los investigadores denominan «la Internet de las plantas».

No es la primera vez que se colocan sensores en los árboles para medir cómo usan el agua. Hasta ahora, sin embargo, «nadie había creado una red inalámbrica entre plantas que transmitiese información consumiendo tan solo algunos microvatios y con un coste de unos pocos euros», explica el líder del proyecto, Aggelos Bletsas, profesor de ingeniería eléctrica e informática en la Universidad Técnica de Creta.

La red consta de varios componentes: una estación de radio de FM, una antena conectada a un limón que crece en un árbol, un sensor de humedad en el fruto, un transistor conectado a la antena y un receptor de FM, como los que encontramos en los teléfonos inteligentes. Primero, la antena capta la señal de la estación de FM y la envía al transistor, que la modula por medio del sensor de humedad. El sensor enciende y apaga el transistor con una frecuencia que depende del nivel de humedad de la planta. Por último, la antena transmite esa información al receptor de radio de un teléfono móvil.

Todo ello permite que las plantas «les digan» a los agricultores si necesitan agua. «Podemos "escuchar" la humedad de la planta mediante nuestra radio de FM del móvil y un sensor de tres euros», explica Bletsas. «Dos de estos sensores por acre [0,4 hectáreas] podrían cambiar la forma en que practicamos la agricultura.» El científico aclara que para obtener resultados óptimos podrían hacer falta más sensores, sobre todo si el campo está inclinado y no es posible regarlo de manera uniforme. Según los investigadores, este tipo de información en tiempo real ayudaría a controlar mejor la humedad del aire y el suelo, así como a reducir el uso de plaguicidas y optimizar el de abonos.

¿Y por qué no emplear otros medios inalámbricos habituales, como Bluetooth? «Nuestra técnica no solo es menos compleja, ya que usamos únicamente las señales del entorno, sino que un sensor basado en Bluetooth cuesta unos 22 euros. Nuestro objetivo final es lanzar al mercado sensores que cuesten menos de un euro», dice Bletsas.

Otros han elogiado la idea. «Bletsas y su equipo están revolucionando la detección ambiental con componentes muy simples y una potencia sorprendentemente baja», opina Alexandros Dimakis, profesor de ingeniería eléctrica e informática en la Universidad de Texas en Austin, quien no participó en la investigación. «Su trabajo podría constituir una técnica transformadora de la Internet de las cosas para la agricultura y para la supervisión del entorno.»

—Stav Dimitropoulos

THOMAS FUCHS

21 de diciembre de 2018

El desfase entre el mediodía solar y las doce se da todo el año, pero el horario de verano V exagera la diferencia con respecto al de invierno I.

Alaska

21 de junio de 2019

Nueva York

China

Bogotá

El mediodía solar ocurre al mismo tiempo en todos los puntos de igual longitud (*líneas verticales*). Sin embargo, la hora oficial de cada país puede variar a lo largo de dicha línea. Por ejemplo, el 21 de junio, el mediodía solar ocurrirá en Bogotá a las 11:58, pero acontecerá a las 12:58 en Nueva York.

En Alaska y China se dan algunas de las mayores diferencias entre el mediodía solar y las doce. El 21 de junio en Nome, una población de Alaska, el sol alcanzará su punto más alto a las 15:03. Y aunque China se extiende a lo largo de cinco husos horarios, todo el país adopta la misma hora, correspondiente a UTC+8. En las zonas occidentales del país, el mediodía solar tendrá lugar el 21 de junio a las 15:05.

Cada punto representa un dato. Para numerosas islas pequeñas se carece de ellos.

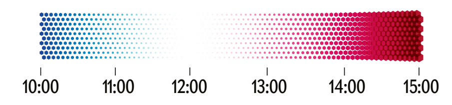
ZONAS HORARIAS

Falsos mediodías

En muchos lugares, el sol llega a su punto más alto en el cielo bien pasadas las doce

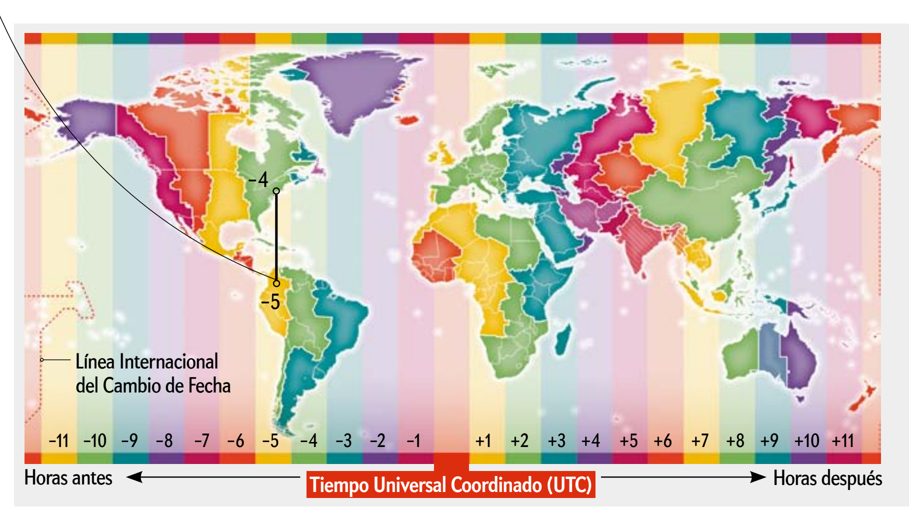
Hora local en el mediodía solar

21 de junio de 2019



En el pasado, las ciudades definían las doce del mediodía como el momento en que el sol alcanzaba su punto más alto; es decir, coincidente con el mediodía solar. Sin embargo, a finales del siglo XIX ya resultaba inconveniente que los relojes de municipios cercanos marcasen horas distintas. Se establecieron zonas horarias: grandes regiones con la misma hora legal (*abajo*). Pero, eso generó diferencias entre el mediodía solar y las doce. Este mapa indica, para el 21 de junio, cuánto se retrasa (*rojo*) o anticipa (*azul*) el mediodía solar con respecto a las doce. En la mayor parte de los sitios ocurre bastante después. Por tanto, nuestros amaneceres y anocheceres suceden más tarde que los de nuestros antepasados. La pauta es análoga en invierno (*inserto*) aunque menos pronunciada, ya que el horario de verano de muchas naciones exagera la diferencia.

—*Nadieh Bremer*



FUENTE: OPENSTREETMAP (*datos horarios*)

Retoques en las zonas horarias

La disparidad entre el mediodía solar y las doce es menor en aquellas regiones que ajustan su hora legal a partir del Tiempo Universal Coordinado (UTC) siguiendo los meridianos. En Australia occidental, por ejemplo, la concordancia con la zona UTC+8 es casi perfecta. Allí el mediodía solar ocurre a las doce, aunque tiende a adelantarse un poco al este y a retrasarse ligeramente al oeste. Pero, por diversas razones, numerosos países adelantan la hora con respecto a la de su huso horario natural, ya sea porque desean disfrutar de luz solar hasta más tarde o para que la hora coincida con la de algún país vecino.

En las zonas con franjas oblicuas, la diferencia con el UTC es fraccionaria (por ejemplo, en India es UTC+5:30).

ETOLOGÍA

Inteligencia viscosa

Los mohos mucilaginosos toman decisiones complejas y variadas

En la célebre película *El Mago de Oz*, el espantapájaros anhela tener un cerebro hasta que se percata de que ya posee el ingenio que necesita. De modo similar, los mohos mucilaginosos acelulares (extrañas masas gelatinosas formadas por una única célula dotada de miles de millones de núcleos) carecen de cerebro, pero en ocasiones actúan como si fueran seres mucho más complejos. «No podemos decir que tengan personalidad, porque sonaría muy extraño, pero estas células gigantes hacen gala de comportamientos bastante complejos y muestran actitudes distintas a la hora de tomar una decisión», afirma Audrey Dussutour, etóloga de la Universidad de Toulouse III–Paul Sabatier. [*Véase* «La masa devoradora: una célula gigante e inteligente», por Audrey Dussutour y David Vogel; Investigación y Ciencia, octubre de 2018.]

A esta especialista y a sus colaboradores les intrigaba saber de qué modo tres cepas de una especie de moho mucilaginoso, originarias de Japón, Australia y EE.UU, sopesarían la rapidez y el acierto durante la búsqueda de alimento. Les presentaron alimentos de diversa calidad y observaron cuáles optaban por engullir. La cepa japonesa actuó con premura eligiendo siempre el primer alimento que encontraba ante sí. En cambio, la australiana se tomó su tiempo antes de decantarse en general por el alimento mejor. La estadounidense decidió actuar con más lentitud que la japonesa pero no tanta como la australiana, aunque también eligió el bocado de mayor calidad.

El presuroso moho nipón seguramente aventajaría a los otros en lugares donde los recursos escaseasen y la competencia fuera enconada, cuando cualquier cosa que llevarse a la boca es mejor que nada, según razonaban los autores el pasado febrero en *Proceedings of the Royal Society B*. La cepa australiana estaría mejor adaptada a los entornos ricos en recursos, donde meditar la decisión mejora el aporte de nutrientes. La cepa estadounidense probablemente prosperaría en ambas circunstancias.

Tales hallazgos imprimen un giro ecológico al creciente volumen de trabajos que están desvelando la capacidad de los organismos más simples para tomar decisiones, opina James Marshall, biólogo teórico y bioinformático de la Universidad de Sheffield, ajeno al estudio. «La demora en elegir la decisión correcta tiene sentido cuando se está solo, pero cuando se compite con otros, es preferible ser rápido aunque se sea un poco burdo.»

—Rachel Nuwer

ECOLOGÍA

Amistad inesperada

Los murciélagos y los ciervos se echan una mano



¿Podremos algún día prescindir de los repelentes de insectos? Algunos ciervos de Minnesota confían en bandadas de murciélagos para que devoren los enjambres de tábanos que los atormentan con sus picaduras. Un equipo de investigadores ha descrito esta inédita relación simbiótica entre el ciervo de Virginia y una especie de quiróptero no identificada, una conducta que han observado en imágenes de fototrampeo y en persona en la reserva científica de Cedar Creek.

«Los murciélagos parecen atraídos por los tábanos que revolotean en torno a los ciervos», afirma la directora del estudio Meredith Palmer, entonces investigadora posdoctoral en la Universidad de Minnesota. Las relaciones simbióticas entre mamíferos herbívoros y aves se conocen desde hace tiempo, pero es «sumamente infrecuente que dos mamíferos traben una relación así».

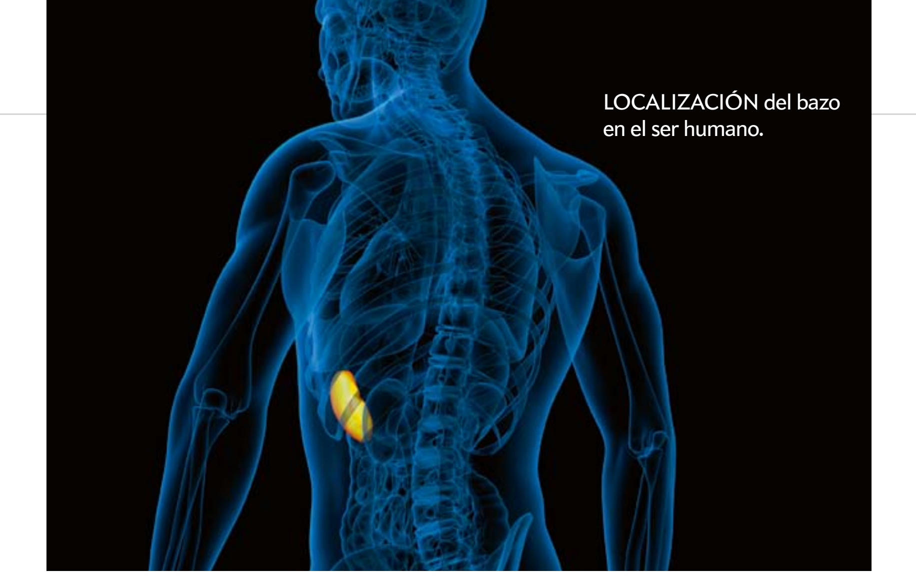
Los tábanos y las moscas hematófagas propinan picaduras dolorosas que pueden infectarse y transmitir enfermedades, por lo que la acción de los murciélagos supone un gran alivio para los ciervos en los meses estivales. Los herbívoros actúan como cebo y proporcionan un verdadero festín a sus amigos alados. Estos, a su vez, «ven reducido el tiempo de búsqueda, pues no precisan volar por todo el bosque para encontrar los tábanos», explica Palmer. El estudio se publicó en marzo en *Ethology*.

Craig Willis, profesor de biología en la Universidad de Winnipeg, en Manitoba, que no ha participado en la investigación, afirma que el descubrimiento deja entrever la labor de control de plagas que los murciélagos podrían estar brindando a la humanidad: «Si controlan a los insectos que pican a los ciervos, tal vez estén haciendo lo mismo por nosotros».

La investigación ecológica acostumbra a estudiar las interacciones entre los depredadores y las presas, pero relega a un segundo plano los modos positivos en que los animales se prestan ayuda, matiza Palmer. «Existe una gran laguna» en torno a las relaciones simbióticas mutuamente beneficiosas.

—Joshua Rapp Learn

THOMAS FUCHS (*ilustración*); DON JOHNSTON, GETTY IMAGES (*ciervo*)


LOCALIZACIÓN del bazo en el ser humano.

TECNOLOGÍA MÉDICA

Terapia sónica

En ratones, estimular el bazo con ultrasonidos ayuda a combatir la inflamación

Hace tiempo que los ultrasonidos se emplean en medicina para obtener imágenes. En los últimos años, sin embargo, los científicos han comenzado a explorar un nuevo uso: utilizarlos para estimular los nervios y tratar enfermedades. En dos estudios recientes con ratones, los investigadores concentraron las vibraciones sónicas en ciertos nervios del bazo que se comunican con el sistema inmunitario. Tras ello, los animales vieron reducida su respuesta inflamatoria. Si la técnica demuestra ser segura y eficaz en el ser humano, el método podría dar lugar a un tratamiento no invasivo para enfermedades inflamatorias, como la artritis reumatoide.

Hace unos veinte años, el neurocientífico Kevin Tracey y sus colaboradores descubrieron que las señales cerebrales que recorren el nervio vago ejercen un control sobre el sistema inmunitario. «Esas [señales] son reflejos primitivos producidos en el tronco encefálico y evolucionaron para preservar la integridad y la salud de las células del organismo», explica Tracey, presidente del Instituto Feinstein de Investigación Médica, en el estado de Nueva York. Por tanto, estimular dicho nervio proporciona un modo de manipular esos reflejos.

El nervio vago consta de un haz de fibras que se ramifican y penetran en numerosos órganos. Y se conecta con el sistema inmunitario por medio de un segundo nervio que llega al bazo, donde las células inmunitarias hacen una parada antes de volver al torrente sanguíneo. Los nuevos trabajos, publicados en marzo en *Nature Communications*, sugieren que enviar ultrasonidos al bazo de los múridos a través de la piel puede actuar sobre las terminaciones nerviosas y que eso podría ser tan eficaz como estimular directamente el nervio vago, lo que requiere electrodos implantados quirúrgicamente.

En uno de los estudios, dirigido por miembros del Instituto Feinstein y de la compañía GE Research, las ratas que recibieron unos minutos de tratamiento mostraron una menor respuesta inflamatoria ante la inyección de una toxina. En el segundo, un equipo de la Universidad de Minnesota y otros investigadores redujeron los síntomas de la artritis inflamatoria en ratones estimulando los nervios del bazo veinte minutos al día durante una semana. Centrarse en el bazo podría constituir un método más preciso que hacerlo en el nervio vago. «Actuar sobre el bazo reduce los efectos [secundarios] en todo el organismo», afirma Hubert Lim, autor principal de esta última investigación.

Aún se sabe muy poco sobre la manera en que la aplicación repetida de ultrasonidos afecta al bazo o si tiene efectos perjudiciales, señala Denise Bellinger, neurocientífica de la Universidad de Loma Linda, en California, que no participó en ninguno de los trabajos. Un ensayo clínico en curso trata de evaluar la seguridad del tratamiento en personas con artritis reumatoide. Una incógnita aún mayor es el mecanismo por el que los ultrasonidos activan los nervios. Ahora los científicos están investigando el uso de ultrasonidos en otras partes del sistema nervioso, incluido el cerebro. «Sabemos cómo controlar los nervios con electricidad y llevamos más de cien años haciéndolo, pero la idea de regular las señales nerviosas con ultrasonidos es un campo completamente nuevo», concluye Tracey.

—Bahar Gholipour

AGENDA

CONFERENCIAS

5 de junio
En busca de la mente
Xurxo Mariño, Universidad de La Coruña
Organiza: Revista Mètode
Centro Cultural La Nau
Valencia
metode.es

9 de junio
La química y el cine
Bernardo Herradón, CSIC
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
Alcobendas
www.muncyt.es

17 de junio
La tabla periódica: Confusiones conceptuales y terminológicas
Claudi Mans, Universidad de Barcelona
Residencia de Investigadores, CSIC
Barcelona
www.taulaperiodica.cat

EXPOSICIONES

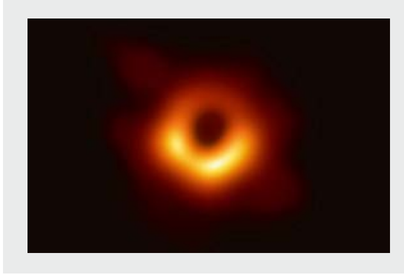
Hasta el 10 de junio
Palmas de La Española
Real Jardín Botánico
Madrid
www.rjb.csic.es

Hasta el 30 de junio
Acuarios y etología
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es

OTROS

1 de junio — Jornada
Cerebro, arte y sistema visual
Organiza: Asociación Murciana de Neurociencia
Laboratorio Artístico del Carmen
Murcia
neuroamune.com

12 de junio — Mesa redonda
Ser o no ser: Diálogos entre ciencia y filosofía
Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona
Barcelona
www.cccb.org

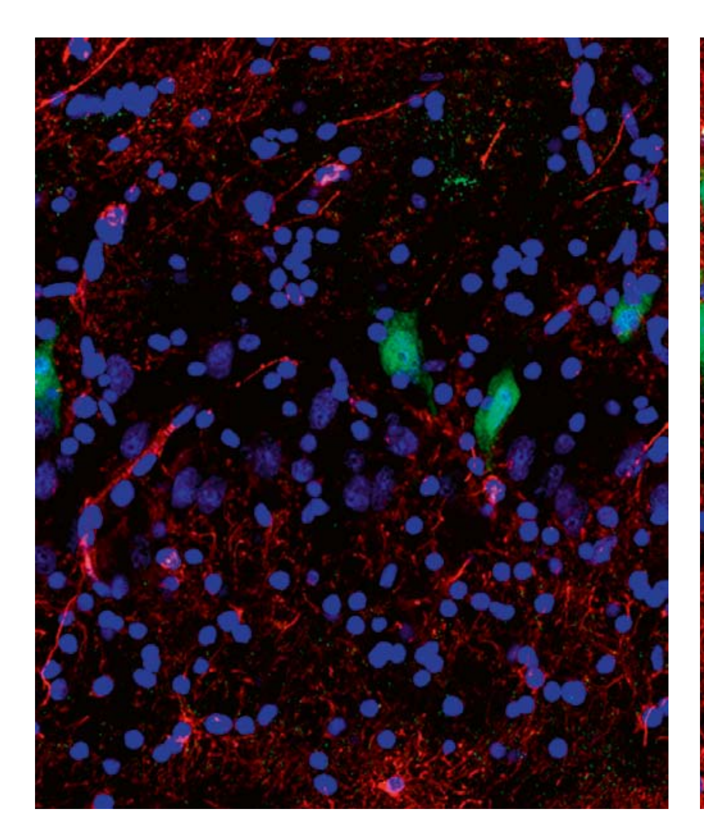
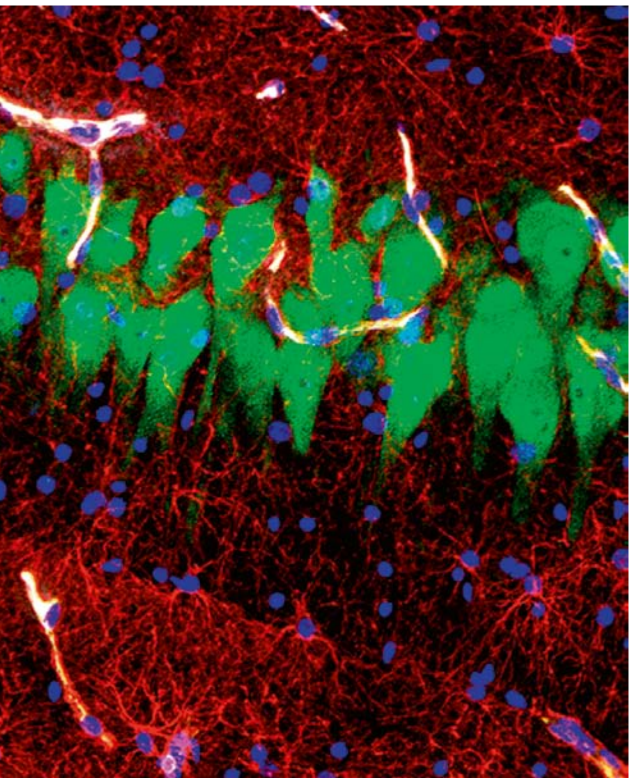


NEUROCIENCIA

Recuperación cerebral tras la muerte

Un sistema de perfusión ha restablecido las funciones celulares del cerebro de cerdos que llevaban muertos varias horas

SIMON MAKIN

POCAS HORAS DESPUÉS DE LA MUERTE la mayoría de las células del cerebro se han degradado en los cerdos (*izquierda*; *en verde, las neuronas y en rojo, los astrocitos*). Una nueva técnica ha conseguido que sigan funcionando (*derecha*).

STEFANO G. DANIELE Y ZVONIMIR VRSELJA, LABORATORIO SESTAN Y ESCUELA DE MEDICINA DE YALE

Una de las dos definiciones jurídicas de muerte es la abolición irreversible de todas las funciones cerebrales, lo que comúnmente se denomina «muerte cerebral» o «muerte encefálica». (La otra es el cese de la función cardiorrespiratoria.) Hasta ahora se creía que, inmediatamente después de la muerte, las células del cerebro se degradaban de forma rápida e irreversible. Pero un sorprendente estudio publicado el pasado abril en *Nature* indica que sería posible preservar o restablecer gran parte de la funcionalidad incluso horas después del fallecimiento. Un equipo científico dirigido desde la Escuela de Medicina de Yale ha logrado reactivar algunas funciones del cerebro entero de cerdos que habían sido sacrificados cuatro horas antes, y las ha mantenido durante seis horas más.

El equipo emprendió este trabajo tras constatar que era posible recoger células del cerebro después de la muerte y mantenerlas en cultivo para estudiarlas, según explicó el neurocientífico Nenad Sestan, director del proyecto. «Si era posible hacerlo en una placa de Petri, nos preguntamos si también lo sería en un cerebro intacto.» El sistema que idearon, llamado BrainEx, consta de tres elementos: un circuito de perfusión informatizado, con bombas, filtros y depósitos; un sucedáneo de sangre que no contiene células pero que puede transportar oxígeno, junto con varios compuestos citoprotectores; y una técnica quirúrgica para aislar el órgano y conectarlo al aparato.

Los investigadores compararon los cerebros conectados a BrainEx con los que perfundieron con un líquido inerte o que no conectaron a ningún dispositivo, y evaluaron el estado de todos ellos en diferentes momentos. El sistema redujo la muerte celular, conservó la integridad anatómica y restituyó las funciones circulatoria y metabólica, además de algunas funciones celulares. Incluso se observaron respuestas inflamatorias de las células inmunitarias (la neuroglía) cuando se introdujo una molécula que remeda las infecciones bacterianas. Los resultados

señalan que las células son mucho más resistentes de lo que se pensaba a la falta de riego sanguíneo, sin el cual el aporte de oxígeno cesa (isquemia). «Ninguna hipótesis nos permitía imaginar que conseguiríamos restaurar las células hasta ese nivel», afirmó Sestan ante la prensa. «Nos sorprendió muchísimo.»

Cambio de paradigma científico

El trabajo puede representar una importante contribución a los métodos actuales para estudiar el cerebro. La investigación recibió financiación de la Iniciativa BRAIN (siglas inglesas de Investigación del Cerebro mediante Neurotécnicas Avanzadas e Innovadoras), de los Institutos Nacionales de la Salud de los Estados Unidos (NIH). «Es un verdadero adelanto para la investigación neurológica, una herramienta nueva que acerca la neurociencia básica a la investigación clínica», anunció Andrea Beckel-Mitchener, directora de proyectos de la Iniciativa BRAIN, del Instituto Nacional de Salud Mental.

Por lo pronto, los resultados alteran nuestra noción de la muerte cerebral. «A los médicos y científicos nos han inculcado desde siempre que bastan un par de minutos para que no haya vuelta atrás; esto sin duda desmonta esa idea», sostiene Madeline Lancaster, de la Universidad de Cambridge, experta en organoides cerebrales («minicerebros» fabricados con células madre), que no intervino en el proyecto [*véase* «Cerebros creados en el laboratorio», por Jürgen A. Knoblich; Investigación y Ciencia, marzo de 2017]. «Donde veo más potencial a corto plazo es en ese cambio de paradigma; espero que también promueva las investigaciones en personas que presentan muerte cerebral, para dilucidar cómo podríamos reanimarlas.» Ampliar el tiempo que debe transcurrir antes de certificar la muerte cerebral conlleva otras consecuencias: podría retardar la donación de los órganos. Uno de los beneficios a corto plazo es la oportunidad de comprender mejor la lesión isquémica. «Confiamos en esclarecer cómo reaccionan las células cerebrales a la parada circulatoria y si podemos intervenir para rescatarlas», indicó Sestan. «Así, podríamos concebir mejores tratamientos para el ictus y otros trastornos que provocan la muerte neuronal.»

Más a largo plazo, el sistema podría ser muy útil para estudiar la conectividad cerebral, la función de los circuitos encefálicos y los procesos patológicos. Ya es posible averiguar bastante con los cortes anatomopatológicos, los organoides y los cerebros obtenidos de autopsias, pero este sistema tiene al menos dos ventajas. En primer lugar, un cerebro intacto permite estudiar los circuitos cerebrales como nunca antes. «Si en nuestros estudios hay que tener en cuenta el contexto del órgano entero, sin duda es una ventaja», comenta Lancaster. «Si supiéramos que [los circuitos cerebrales] funcionan, aunque sea hasta cierto punto, poder examinar un circuito indemne sería sumamente ventajoso.» En segundo lugar, las autopsias se limitan a momentos concretos, lo cual condiciona la comprensión de la evolución patológica. Por ejemplo, algunos expertos creen que en las enfermedades neurodegenerativas, como el alzhéimer, intervienen proteínas tóxicas que se diseminan por el cerebro. «Con esto podríamos hacer muchas más cosas, alterando el cerebro de diferentes maneras: por ejemplo, introducir un prion o una proteína amiloide β, y observar cómo se dispersa», explica Lancaster. «La clave es poder verlo en tiempo real, y esta sería una manera de hacerlo.»

Cuestiones éticas

El equipo se movió dentro de los parámetros éticos actuales desde la concepción misma de los experimentos. Una de sus mayores dudas era si los cerebros reanimados presentarían algún tipo de consciencia. El estudio quiso evitar, expresamente, toda posibilidad de que regresase el más mínimo psiquismo, y los investigadores estaban preparados para bajar las temperaturas y administrar anestésicos a fin de suprimir dichos signos en caso de que apareciesen. Vigilaron de manera continua los registros eléctricos de la superficie de los cerebros y no apreciaron indicios de las descargas globales que cabría esperar si hubiese algo remotamente semejante a una actividad cognitiva. «Estoy seguro de que no se despertó ninguna consciencia en esos cerebros», sostiene el investigador puntero en este campo Christof Koch, del Instituto Allen de Neurociencia, en Seattle. No detectaron ninguna de las señales que asociamos con la consciencia, ni siquiera con el sueño, detalla Koch. «Únicamente una línea plana, que implica la ausencia absoluta de cualquier tipo de consciencia.»

Pero la inexistencia de actividad eléctrica quizá se debiera, en parte, a que la solución de perfusión contenía bloqueantes neuronales. Los investigadores los incluyeron porque querían mantener los cerebros en un estado de inactividad, a fin de potenciar al máximo la recuperación celular. Un cerebro activo requiere un aporte energético muchísimo mayor, y la mera activación puede dañar las neuronas (fenómeno que se conoce como «excitotoxicidad»). Tomaron muestras de tejido a fin de comprobar que seguía habiendo neuronas con funcionalidad eléctrica, para lo cual hubo que eliminar la solución al preparar las muestras para los estudios electrofisiológicos.

¿Pero qué habría pasado si no hubiesen utilizado estos bloqueantes? «No podemos afirmar nada con certeza sobre esa cuestión, porque no hicimos esos experimentos», admite Stefano Daniele, coautor principal del estudio. Si en el futuro se consiguiese despertar un mayor nivel de consciencia en los cerebros reanimados, se abriría un debate sobre lo que puede considerarse que realmente está muerto. Estos planteamientos se abordan en otro comentario que acompaña al artículo, firmado por la jurista Nita Farahany, especializada en bioética, del grupo de neuroética de la Iniciativa BRAIN, que asesoró a los investigadores desde el comienzo.

El equipo también consultó al comité de ética de la investigación con animales de la Universidad Yale, que confirmó que el estudio no estaba sujeto a las normas de protección del bienestar animal. El motivo más obvio es que los cerdos ya estaban muertos: los investigadores obtuvieron los cerebros del despiece de empresas cárnicas, de modo que no hizo falta sacrificar ningún animal para la investigación. En cualquier caso, dichas normas no rigen la cría de animales para alimentación.

En lo sucesivo, el trabajo habrá de reproducirse en otros laboratorios que tendrán que aprender a manipular el complejo artilugio. El mismo equipo de Sestan pretende determinar cuánto tiempo pueden mantenerse los cerebros con esta técnica: la fase de perfusión del experimento solamente duró seis horas porque, para entonces, los cerebros de control que no estaban conectados al sistema BrainEx se habían degradado tanto que era imposible hacer comparaciones significativas.

Si es posible reanimar un cerebro durante un período prolongado y los investigadores se centran en restablecer las funciones eléctricas in situ, estaríamos adentrándonos en un territorio desconocido para la ética. «Conviene responder algunas preguntas primero», apunta Farahany. «¿Podemos lograr la recuperación electroencefalográfica? ¿Cuáles serán los límites si es que alguna vez lo conseguimos? ¿Y qué repercusiones habrá para la investigación con animales y, en última instancia, con seres humanos?» Farahany opina que estos interrogantes nos obligan a redefinir, desde un punto de vista ético, lo que hasta ahora considerábamos tejidos muertos. «El potencial [de recuperación] es lo que suscita una clasificación moral nueva que requiere un enfoque distinto. Podríamos actuar con la máxima precaución, que sería otorgar [a esos tejidos] una protección igual o parecida que a los animales de experimentación.» Estos ensayos probablemente se intentarían primero con roedores, eliminando las sustancias que bloquean la actividad eléctrica. Si se detectase cualquier señal, por pequeña que fuera, que indicase algún tipo de consciencia, nos internaríamos en un terreno en el que sin duda haría falta establecer nuevas pautas éticas. «Llegado ese punto, si pasamos a verlo como un animal vivo, sería adecuado reducir el riesgo de dolor o sufrimiento», asevera Farahany. «El problema es que, ahora mismo, lo vemos como tejido inerte para investigación, pero ya no tenemos tan claro que esté muerto, aunque realmente tampoco está vivo.»

Simon Makin *es periodista científico especializado en psicología, neurociencia y salud mental.*

PARA SABER MÁS

Restoration of brain circulation and cellular functions hours post-mortem. Zvonimir Vrselja et al. en *Nature*, vol. 568, págs. 336-343, abril de 2019.

Part-revived pig brains raise slew of ethical quandaries. Nita A. Farahany, Henry T. Greely y Charles M. Giattino en *Nature*, vol. 568, págs. 299-302, abril de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Qué ocurre en nuestro encéfalo cuando morimos. Anna Von Hopffgarten en *MyC* n.º 93, 2018.

¿Es mensurable la consciencia? Kristof Kock en *IyC*, enero de 2018.

INGENIERÍA

Enjambres robóticos inspirados en la biología

Consiguen que un ejército de «células robóticas» sea capaz de ejecutar tareas colectivas sin tener que ejercer sobre él ningún tipo de control centralizado

METIN SITTI

En los sistemas biológicos, el comportamiento colectivo a gran escala puede emerger a partir de la coordinación de pequeños componentes individuales que se mueven de manera aleatoria. Así ocurre con las células que se agrupan y migran de forma conjunta durante la curación de una herida o en la propagación de un cáncer. Inspirados por estos mecanismos biológicos, el ingeniero Shuguang Li, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y otros investigadores han diseñado un sistema robótico colectivo que exhibe una locomoción determinista como consecuencia del desplazamiento aleatorio de sus componentes individuales. El resultado demuestra el potencial de los métodos estocásticos para lograr comportamientos colectivos robustos.

En el sistema descrito por Li y sus colaboradores, las «células» son robots con forma de disco débilmente acoplados entre sí. No pueden moverse con independencia unos de otros ni ser manipulados individualmente. Cada disco solo puede hacer dos cosas: expandirse o contraerse (cada robot mide 15,5 centímetros de diámetro en el estado contraído y 23,5 al expandirse). En ausencia de un estímulo externo, el sistema se desplaza al azar. Sin embargo, cuando los componentes se programan para ajustar su diámetro en respuesta a una señal ambiental variable, como la luz, surge una locomoción coordinada que hace que el conjunto avance hacia la fuente del estímulo.

Los autores han realizado experimentos con sistemas de varias decenas de robots así como simulaciones informáticas con conjuntos de hasta 100.000 unidades. Su trabajo demuestra que el sistema puede moverse y transportar objetos, avanzar hacia una fuente de luz y evitar obstáculos. Por último, esa dinámica se mantiene incluso cuando el 20 por ciento de los componentes no funciona como debería, lo que pone de relieve la robustez del comportamiento colectivo frente a fallos en los elementos individuales.

Alternativa prometedora

Hasta ahora, la mayoría de los estudios de este tipo habían considerado componentes basados en diseños deterministas relativamente complejos, con capacidad de moverse independientemente unos de otros y con la posibilidad de manipularlos de manera individual. Buena parte de esos sistemas presentan una flexibilidad limitada en términos de las configuraciones permitidas y de su escalabilidad. Además, requieren cierto grado de control centralizado, lo cual restringe aún más sus capacidades y la posibilidad de variar la escala del sistema.

En este sentido, la «robótica de partículas» de Li y sus colaboradores proporciona una alternativa prometedora. Aparte de inspirarse en los sistemas biológicos, la técnica se sirve de los fenómenos típicos de la física estadística, donde el comportamiento global de un gran número de elementos estocásticos puede modelizarse y controlarse sin necesidad de detallar la trayectoria de cada partícula. Como consecuencia, este nuevo enfoque ofrece ventajas sustanciales, en especial cuando se aumenta el número de componentes o se reduce el tamaño de cada uno. Esto último será necesario en las futuras aplicaciones de estos sistemas a áreas tan diversas como la exploración, la construcción o la medicina.

Con todo, el nuevo enfoque adolece también de algunos inconvenientes. Primero, si no se genera un gradiente de la señal ambiental a lo largo del conglome-



ROBOTS-PARTÍCULA: El movimiento aleatorio de estas unidades robóticas simples, desarrolladas por el Instituto de Tecnología de Massachusetts y otras instituciones, conduce a una dinámica de grupo determinista que les permite transportar objetos, avanzar hacia la luz y evitar obstáculos.

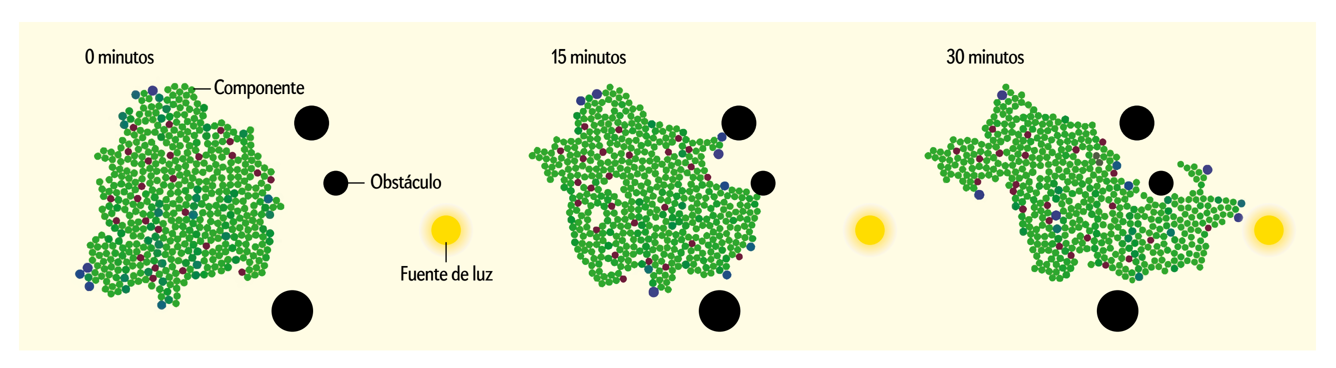
rado de partículas, el sistema no puede orientarse hacia la fuente. En segundo lugar, las posiciones de partida han de configurarse manualmente, ya que las unidades no pueden moverse de forma independiente para interactuar entre sí y agruparse. El tercero es que los autores han limitado sus experimentos a una cantidad reducida de unidades, que además son relativamente lentas y voluminosas. Por último, debido a la naturaleza estocástica del conjunto y al acoplamiento y ubicación aleatorios de las partículas, la técnica no resulta adecuada para tareas como el autoensamblaje dirigido ni para su autoorganización en geometrías complejas y preestablecidas.

De la ingeniería a la medicina

Gracias a los avances en robótica a pequeña escala, hoy es posible diseñar y fabricar grandes cantidades de componentes estocásticos o deterministas que exhiban comportamientos colectivos similares a los observados en el sistema de Li y sus colaboradores. En los últimos años, el control de las interacciones magnéticas entre componentes ha permitido crear enjambres de microrrobots con un comportamiento colectivo bien definido.

En general, la estrategia para controlar dichos enjambres se basa en la respuesta de cada una de las unidades a un campo global, como un campo magnético regulado a distancia. Y, aunque en tal caso resulta difícil manejar cada elemento de forma individual, las interacciones colectivas pueden controlarse de forma global, lo que da lugar a interacciones locales programables, a la capacidad de autoensamblaje y a un comportamiento coordinado. Este método se ha usado para obtener ensamblajes bidimensionales colectivos, así como la desarticulación y manipulación de enjambres microrrobóticos en una interfaz de aire y agua.

Al igual que en buena parte de los trabajos previos, el sistema robótico de Li y sus colaboradores funciona principalmente en dos dimensiones. Extenderlo a tres dimensiones e inducir un comportamiento locomotor más complejo, tanto en superficies como en el seno de un fluido, se traduciría en un aumento de sus posibles aplicaciones. Sin embargo, los sistemas tridimensionales plantean todo tipo de desafíos en lo que respecta a conseguir dinámicas robustas, agrupaciones estables, métodos programables y reversibles de conexión entre componentes, así como para avanzar en su miniaturización y control.



«CÉLULAS» ROBÓTICAS: Un nuevo sistema robótico formado por un gran número de unidades débilmente acopladas es capaz de dirigirse hacia una fuente de luz y evitar obstáculos. Cada componente es un disco de unos 20 centímetros de diámetro que solo puede contraerse (*verde*) o expandirse (*azul*). A pesar de que el comportamiento de cada uno es aleatorio, en el sistema en su conjunto emerge una locomoción determinista que lo guía hacia la luz. Dicho movimiento se muestra robusto frente a la presencia de unidades defectuosas (*granate*).

En un futuro cercano será clave demostrar las aplicaciones médicas o ingenieriles que podrían exhibir estos sistemas y que serían imposibles mediante otras técnicas. Por ejemplo, un enjambre de microrrobots estocásticos impulsados por bacterias podría hacer uso de esta nueva robótica de partículas para administrar fármacos en zonas específicas del cuerpo humano a las que resulta difícil acceder. Tales enjambres podrían estar dirigidos por gradientes químicos, gradientes de oxígeno o cambios en el *p*H del entorno de los tejidos cancerosos. De hecho, varios estudios ya han demostrado que los enjambres microrrobóticos impulsados por bacterias tendrían aplicaciones potenciales en la administración dirigida de medicamentos, en el diagnóstico médico y como sensores ambientales.

Metin Sitti *trabaja en el Departamento de Inteligencia Física del Instituto Max Planck de Sistemas Inteligentes, en Stuttgart, y en las escuelas de Medicina e Ingeniería de la Universidad Koç, en Estambul.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 567, págs. 314-315, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Modular self-reconfigurable robot systems: Grand challenges of robotics. Mark Yim et al. en *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 14, págs. 43-52, marzo de 2007.
Mobile microrrobotics. Metin Sitti. MIT Press, 2017.
Particle robotics based on statistical mechanics of loosely coupled components. Shuguang Li et al. en *Nature*, vol. 567, págs. 361-365, marzo de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Enjambres de robots. Robert Grabowski, Luis E. Navarro Serment y Pradeep K. Khosla en *IyC*, enero de 2004.
Abejas robóticas. Robert Wood, Radhika Nagpal y Gu-Yeon Wei en *IyC*, mayo de 2013.
El auge de los nanorrobots. Mihail C. Roco en *IyC*, agosto de 2013.

QUÍMICA

La tabla periódica: una obra inacabada

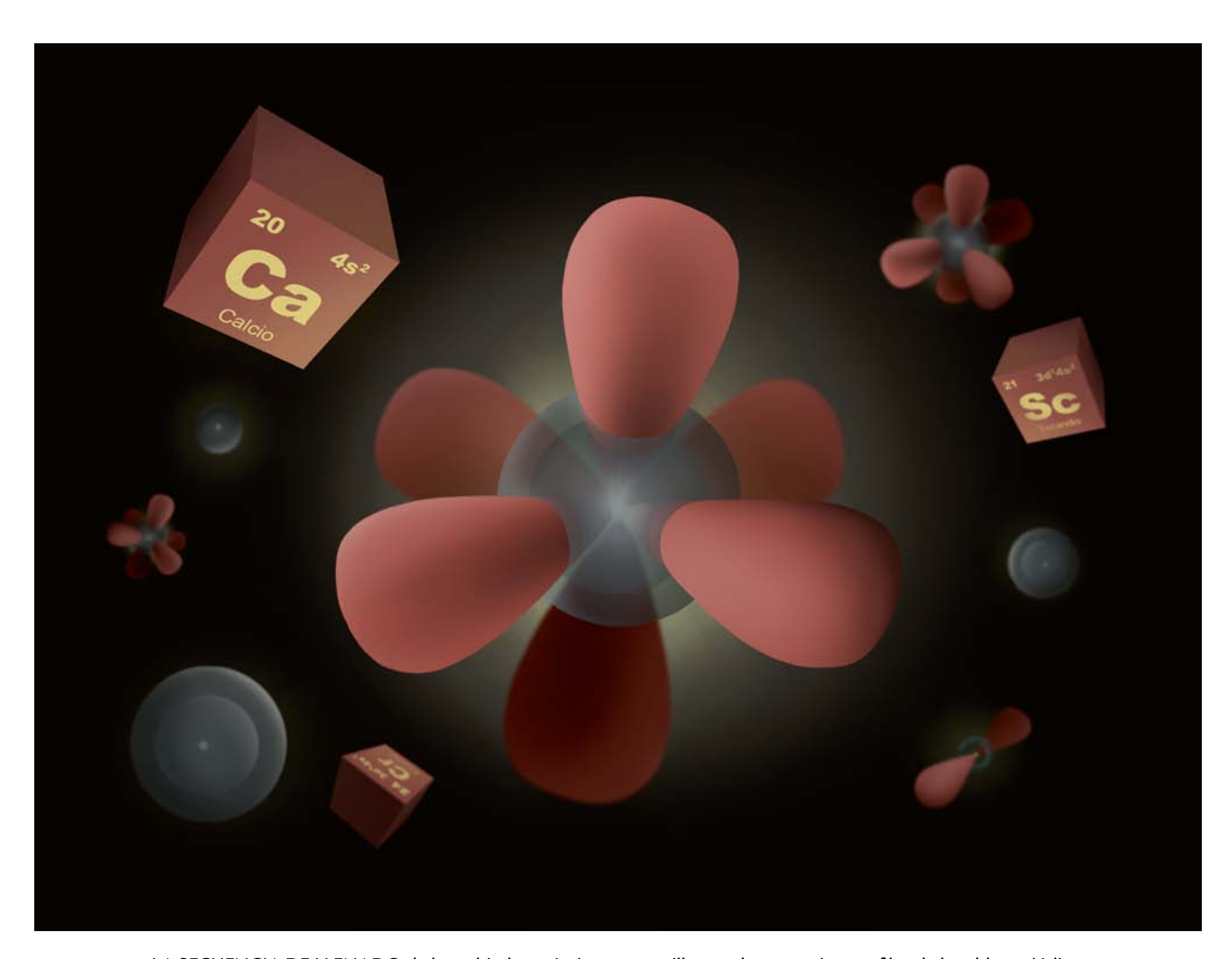
El gran icono de la química plantea todavía ciertos interrogantes. ¿Pueden las ideas de la mecánica cuántica ayudar a resolverlos?

ERIC SCERRI

La tabla periódica de Dimitri Mendeléiev ha tenido tal impacto científico y cultural que muchos piensan que se trata de una obra, en esencia, acabada. Tras 150 años, en pleno Año Internacional de la Tabla Periódica, ¿podemos limitarnos a celebrar sus numerosos éxitos, incorporando ocasionalmente algún elemento pesado creado artificialmente [*véase* «Disputas en la tabla periódica», por Edwin Cartlidge; Investigación y Ciencia, mayo de 2019]?

La respuesta es no. Esta inestimable compilación no está ni mucho menos cerrada. La posición que en ella ocupan ciertos elementos (incluidos el hidrógeno y el helio) es aún tema de discusión. Los químicos no se ponen de acuerdo sobre algunos agrupamientos, tales como qué elementos deben formar el grupo tres. Para los más tradicionalistas, este comprende el escandio, el itrio, el lantano y el actinio. Basándose en las estructuras electrónicas, un número cada vez mayor de investigadores considera que los dos últimos elementos deberían ser reemplazados por el lutecio y el lawrencio. La cuestión no es baladí. Mover un elemento a un grupo diferente podría revelar nuevas propiedades y convertirlo, por ejemplo, en candidato a formar superconductores de alta temperatura.

La descripción cuántica de la estructura electrónica de algunos átomos (en particular elementos de transición como el cobre y el cromo) es difícil de conciliar con los patrones globales de la tabla periódica. No está claro por qué hay más de 1000 variantes de la tabla, o si existe una versión óptima. Ni siquiera la autoridad



LA SECUENCIA DE LLENADO de los orbitales atómicos es sencilla para las tres primeras filas de la tabla periódica, en las que los elementos solo tienen electrones en los orbitales s y p. Pero las cosas se complican cuando superamos el calcio y llegamos a la cuarta fila: el electrón adicional en el escandio no se sitúa en los orbitales 4p, sino en los 3d.

MIKEL RODRÍGUEZ HIDALGO

internacional en este campo, la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, por sus siglas en inglés) está segura. Esta organización afirma no respaldar ninguna ordenación concreta, aunque la versión de la tabla periódica que se encuentra en su página web muestra un bloque de 30 elementos bajo el cuerpo principal. Esto es inconsistente con la interpretación cuántica de los átomos, que predice tan solo 28 para este bloque.

En lo que sigue esbozaré algunos de los problemas pendientes de la tabla periódica y explicaré de qué manera su resolución sigue ayudando a físicos y químicos a comprender y predecir el comportamiento de la materia.

Poder predictivo

Mendeléiev no fue el primero en intentar ordenar los elementos por orden creciente de peso atómico, pero sí en extraer las consecuencias prácticas de esta ordenación. Su esquema de 1869 predecía la existencia de varios elementos entonces desconocidos, entre ellos el galio, el germanio y el escandio. En los 150 años transcurridos desde entonces, la tabla periódica ha servido a los químicos para predecir propiedades atómicas y ha sido fuente de inspiración de experimentos importantes. Físicos desde J. J. Thomson a Erwin Schrödinger la han usado también como banco de pruebas para teorías de la estructura atómica y la mecánica cuántica.

Mendeléiev no sabía por qué los elementos tenían propiedades que se repetían periódicamente. Hoy, gracias a los intentos de muchos físicos por explicar este hecho, sabemos que la estructura del átomo es la base para la ordenación de los elementos.

A principios del siglo xx, físicos como Charles Glover Barkla y Ernest Rutherford se dieron cuenta de que la carga eléctrica del núcleo atómico era aproximadamente la mitad del peso atómico del elemento. En 1911, un economista neerlandés poco conocido y científico aficionado, Antonius van den Broek, propuso una explicación a este fenómeno: los átomos diferentes del hidrógeno estaban constituidos por un número entero de «alfones», una partícula fundamental hipotética cuya masa era la mitad de la del núcleo de helio (dos unidades de masa atómica) y con una unidad de carga eléctrica positiva.

El «alfón» nunca fue observado, pero la hipótesis de Van den Broek está en el origen de la idea de número atómico. Esta cantidad determina la posición de un elemento en la tabla y se define como el número de protones en el núcleo del átomo, que es igual al de electrones orbitando a su alrededor. El físico Henry Moseley confirmó en 1913 la ordenación basada en el

número atómico mediante espectroscopía de rayos X. Esta explicación física justificaba reordenaciones previas, tales como la del propio Mendeléiev, que intercambió las posiciones del telurio y el yodo. Aunque el peso atómico (el criterio usado originalmente por Mendeléiev para ordenar los elementos) del telurio es mayor que el del yodo, su número atómico es menor.

Con el desarrollo de la mecánica cuántica en la década de 1920, los físicos Niels Bohr y Wolfgang Pauli elaboraron una interpretación más sofisticada de la tabla periódica. El llamado principio de *Aufbau* (término alemán que significa «construcción») describe la distribución de los electrones que orbitan alrededor del núcleo atómico; se sigue enseñando en la actualidad. Los electrones orbitan en una serie de capas con energías y distancias al núcleo crecientes, etiquetadas por números enteros (1, 2, 3...). Dentro de cada capa hay orbitales de diferentes tipos, designados por las letras s, p, d y f. Las leyes de la mecánica cuántica limitan el número de electrones que pueden alojarse en cada capa y en cada orbital. Así, el hidrógeno tiene un solo electrón en el orbital 1s. El siguiente elemento, el helio, tiene dos en el mismo orbital. El tercer electrón que posee el litio se acomoda en el orbital 2s y así sucesivamente.

El principio de *Aufbau* usa una simple regla numérica para describir la secuencia en la que se llenan los orbitales. Esta se conoce como la regla de Madelung por el físico Erwin Madelung, que, entre otros, la formuló en la década de 1930. La secuencia de llenado es sencilla para las tres primeras filas de la tabla periódica, en las que los elementos solamente tienen electrones en los orbitales s y p.

Los orbitales 3p se van llenando en los elementos que van del aluminio al argón. Pero las cosas se complican cuando llegamos a la cuarta fila de la tabla. El orbital 4s se llena a continuación en el potasio y el calcio. Entonces aparecen los elementos de transición. El electrón adicional en el siguiente elemento, el escandio, no se sitúa en los orbitales 4p, sino en los 3d. Por eso los metales de transición también se llaman elementos del bloque d. La regla de Madelung incorpora estos pasos no intuitivos, tales como que el llenado del orbital 4s precede al de los 3d y que los 4p son ocupados antes que el 5s.

Hasta el momento, la regla de Madelung no ha sido derivada a partir de la mecánica cuántica u otros principios físicos fundamentales. En 1969, coincidiendo con el centenario de la tabla periódica, el químico Per-Orlov Löwdin declaró esta derivación como uno de los retos más importantes de la química teórica. Cincuenta años después, continúa siéndolo.

Romper las reglas

Pero la situación es aún peor: hay 20 elementos cuya estructura electrónica no parece seguir la regla de Madelung. Algunos filósofos de la ciencia han argumentado que ello demuestra el fracaso de la mecánica cuántica en su intento de explicar la tabla periódica. Tengo que admitir que yo también he caído en esta trampa. Sin embargo, desarrollos recientes indican que, si analizamos el problema con mayor profundidad, la mecánica cuántica puede reconciliarse con el principio de *Aufbau* y la regla de Madelung.

El cromo es uno de esos elementos anómalos. La regla de Madelung predice que debería tener cuatro electrones en sus orbitales 3d y dos en el 4s. Sin embargo, la espectroscopía muestra que el cromo tiene cinco electrones en los orbitales 3d y uno en el 4s. De forma análoga, el cobre, el niobio, el rutenio, el rodio y una docena más de elementos tienen un electrón adicional en los orbitales d o f, en lugar de en los orbitales s más exteriores como cabría esperar.

En 2006, el químico teórico Eugen Schwarz y sus colegas dieron un nuevo empuje al debate. Según el carácter probabilístico de la mecánica cuántica, un átomo puede existir en una superposición de diversas configuraciones electrónicas. Para una energía dada, es posible que un electrón esté en uno o varios orbitales. Todas estas opciones y sus probabilidades tienen que ser tenidas en cuenta al derivar la configuración más estable. Tomando promedios, los estados electrónicos de la mayoría de los átomos cumplen la regla de Madelung. Los cálculos predicen correctamente los estados anómalos y los resultados coinciden con los experimentos. Por lo tanto, la mecánica cuántica explica estos desconcertantes elementos. Sin embargo, la mayoría de químicos, físicos y autores de libros de texto no son conscientes de ello.

En 2010 Schwarz y su equipo explicaron otra peculiaridad de los metales de transición. El orden en el que los electrones salen de algunos átomos cuando estos se ionizan no parece seguir la regla de Madelung. Aunque el electrón adicional del escandio se aloja en un orbital 3d, los experimentos muestran que al ionizarse pierde primero el electrón que se encuentra en el orbital 4s. Esto no tiene sentido en términos energéticos, ya que, según los libros de texto, el orbital 4s tiene menor energía que los 3d. De nuevo, investigadores y profesores han corrido un tupido velo sobre este hecho.

Schwarz usó resultados espectrales de gran precisión para argumentar que, de hecho, en el escandio los orbitales 3d se ocupan antes que el orbital 4s. Aparte de los espectroscopistas atómicos, pocos se habían dado cuenta de ello. Los docentes de la química todavía describen la estructura atómica del elemento precedente en la tabla periódica (el calcio) y extienden el análisis al siguiente. Pero, en realidad, cada elemento tiene su ordenación única de niveles energéticos. Los orbitales 3d del escandio tienen una energía inferior a la del orbital 4s. Así, Schwarz animó a los químicos a abandonar tanto la regla de Madelung como el desafío propuesto por Löwdin de derivarla de principios fundamentales.

Schwarz tiene razón cuando dice que la regla de Madelung se viola al describir la ocupación progresiva de orbitales en un átomo particular. Pero sigue siendo cierto que los electrones que diferencian un elemento del anterior cumplen la regla de Madelung. En el caso del potasio y el calcio, el electrón que los distingue se halla en el orbital 4s. En el caso del escandio, en cambio, el electrón que lo hace diferente del calcio se encuentra en un orbital 3d, aunque este no sea el último electrón que se incorpora cuando el átomo se forma.

En otras palabras, un análisis simple a partir del principio de *Aufbau* y la regla de Madelung sigue siendo válido para entender la tabla periódica en su conjunto. Aunque falla cuando consideramos las ocupaciones de orbitales y energías de ionización de un átomo específico. Sigue, por tanto, vigente, el reto de derivar la regla de Madelung.

Se necesitan teorías

Estos resultados acerca de los orbitales electrónicos no cambian el orden o la localización de ningún elemento en la tabla, incluidos los 20 casos anómalos. Más bien resaltan la estructura teórica subyacente. Nos muestran la robustez de la tabla periódica, así como la de las reglas empíricas desarrolladas a su sombra, tales como la de Madelung.

La mecánica cuántica es muy exitosa a la hora de explicar propiedades específicas de los átomos, pero se necesita algo

más para tener una imagen completa. A pesar de que Schwarz nos previene contra una descripción cuántica superficial de las propiedades químicas, un estudio cuántico más profundo podría revelar una explicación fundamental de la regla de Madelung o, al menos, una nueva manera de entenderla.

Tras 150 años, se requiere todavía el concurso de químicos teóricos, físicos y filósofos para comprender tanto la estructura global de la tabla periódica como la física que le da fundamento. Los experimentos pueden también arrojar luz sobre la cuestión. Tal es el caso del realizado en 2017 por Xiao Dong y sus colaboradores, que mostró que a muy altas presiones el helio puede combinarse con el sodio para formar el compuesto Na_2He. El gran icono de la química merece sin duda toda la atención que le prestamos.

***Eric Scerri**, historiador y filósofo de la química, trabaja en la Universidad de California en Los Ángeles.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 565, págs. 557-559, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Some comments on the periodic system of the elements. Per-Olov Lödwin en *International Journal of Quantum Chemistry*, vol. 3, n.º S3A, págs. 331-334, 1969.
The challenge of the so-called electron configurations of the transition metals. S. G. Wang et al. en *Chemistry. A European Journal*, vol. 12, n.º 15, págs. 4101-4114, 2006.
Some solved problems of the periodic system of chemical elements. W. H. Eugen Schwarz y Shu-Guang Wang en *Quantum Chemistry*, vol. 110, n.º 8, págs. 1455-1465, 2010.
The changing views of a philosopher of chemistry on the question of reduction. Eric R. Scerri en *Essays in the philosophy of Chemistry*, editado por Eric Scerri y Grant Fisher. Oxford University Press, 2016.
A stable compound of helium and sodium at high pressure. Xiao Dong et al. en *Nature Chemistry*, vol. 9, págs. 440-445, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los actínidos. León Garzón en *IyC*, agosto de 1989.
Evolución del sistema periódico. Eric R. Scerri en *IyC*, noviembre de 1998.
La tabla periódica. Eric Scerri en *IyC*, abril de 2008.
Fisuras en la tabla periódica. Eric Scerri en *IyC*, agosto de 2013.

INFORME ESPECIAL

DESCIFRAR LA GRAVEDAD

¿Qué ocurre en el horizonte de sucesos de un agujero negro? ¿Qué física describe la singularidad que, según la teoría de la relatividad general, se oculta su interior? ¿Destruyen realmente estos objetos la información de lo que cae en ellos? Hace décadas que los físicos creen que la respuesta a estas y otras preguntas llegará de la mano de una teoría cuántica de la gravedad. Hasta ahora, sin embargo, todas las propuestas al respecto se han enfrentado a una seria dificultad: la ausencia de datos experimentales que guíen su desarrollo.

Tras décadas de esfuerzos, varios avances acaecidos durante los últimos años podrían ofrecer las primeras esperanzas de darle un vuelco a esa situación. La posibilidad de detectar ondas gravitacionales está permitiendo poner a prueba algunas predicciones de la teoría de Einstein sobre los agujeros negros (*pág. 20*). La creciente capacidad para controlar en el laboratorio las propiedades cuánticas de masas cada vez mayores ha acercado la perspectiva de sondear la naturaleza cuántica del campo gravitatorio (*pág. 28*). Y en el plano teórico, los últimos años han visto revivir una antigua propuesta sobre las propiedades microscópicas del espaciotiempo que, de ser cierta, podría haber dejado su huella en las propiedades de algunas partículas, como el bosón de Higgs (*pág. 36*).

Un siglo después del primer test experimental de la relatividad general de Einstein (el eclipse de 1919), los progresos referidos aquí auguran una nueva y esperanzadora perspectiva en la carrera por descifrar la gravedad. Con suerte, sus frutos podrían llegar en los próximos años.

—*La redacción*



ECOS DESDE EL HORIZONTE

La astronomía de ondas gravitacionales podrá responder pronto a una pregunta fundamental: ¿son los agujeros negros el tipo de objetos que predice la relatividad general?

Pablo Bueno y Pablo A. Cano



COLISIÓN CÓSMICA: Recreación artística de dos agujeros de gusano momentos antes de colisionar. Aunque hipotéticos, el análisis de las ondas gravitacionales que generaría el choque y posterior fusión de este tipo de objetos está allanando el camino para sondear experimentalmente la existencia de objetos compactos alternativos a los agujeros negros.

Pablo Bueno es físico teórico del Instituto Balseiro, en el Centro Atómico Bariloche. Sus investigaciones se centran en la física de los agujeros negros, gravedad e información cuánticas.

Pablo A. Cano investiga en el Instituto de Física Teórica de Madrid, un centro mixto de la Universidad Autónoma de Madrid y el CSIC. Trabaja en física de agujeros negros y gravedad cuántica.



ES POSIBLE QUE LA PRIMERA DESCRIPCIÓN de un agujero negro se deba al geólogo inglés John Michell, quien en 1783 imaginó una «estrella oscura» tan masiva y compacta que ni siquiera la luz podría escapar de su campo gravitatorio. Aunque esta versión primitiva de un agujero negro se basaba en un entendimiento incompleto de la gravedad y de la luz, con el paso del tiempo la intuición de Michell acabaría demostrándose correcta.

Casi un siglo y medio después, en 1915, Albert Einstein propuso la teoría de la relatividad general, la cual explicaba la gravedad como una manifestación de la curvatura del espaciotiempo. Y tan solo unos meses más tarde, en 1916, Karl Schwarzschild, mientras combatía en el frente de la Primera Guerra Mundial, resolvió las ecuaciones de Einstein y encontró la primera solución que describía el campo gravitatorio de un agujero negro tal y como lo entendemos hoy. Sin embargo, no fue hasta los años sesenta cuando los trabajos de Roger Penrose, Stephen Hawking y John Wheeler, entre otros, esclarecieron la verdadera naturaleza de la solución de Schwarzschild. Desde entonces, la posible existencia y las extrañas propiedades de los agujeros negros han fascinado y traído de cabeza a generaciones de físicos, al tiempo que han alcanzado un estatus casi místico en la cultura popular.

En las últimas décadas hemos acumulado importantes indicios experimentales que parecen confirmar la existencia de los agujeros negros. Hasta ahora, sin embargo, tales indicios han sido indirectos, ya que no se basaban en observaciones del agujero negro en sí, sino de su entorno más cercano. Al respecto cabe destacar las impresionantes imágenes de la «sombra» de un agujero negro supermasivo publicadas el pasado mes de abril por la colaboración Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT, por sus siglas en inglés). No obstante, y a pesar de lo espectacular de este resultado, tales observaciones no cuentan con la resolución suficiente para estudiar con detalle el elemento que realmente define a un agujero negro: su horizonte de sucesos, la frontera más allá de la cual nada, ni siquiera la luz, puede escapar.

Esa situación está a punto cambiar. Ello es posible gracias al nacimiento de una nueva era en la física experimental: la de la astronomía de ondas gravitacionales. Estas ondas son perturbaciones en la geometría del espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Se producen en enormes cantidades en grandes cataclismos astrofísicos, como las explosiones de supernova o las colisiones de objetos de gran masa. Aunque constituyen una de las predicciones clave de la teoría de la relatividad general, su detección experimental tardó un siglo en llegar. La primera observación directa de ondas gravitacionales tuvo lugar en 2015 en el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO, por sus siglas en inglés), en Estados Unidos. Según todos los análisis, las ondas detectadas entonces fueron generadas durante el choque y posterior fusión de dos agujeros negros de masa estelar en una galaxia distante. Desde 2015 hasta ahora, aquel descubrimiento se ha visto complementado por más de una decena de observaciones similares, a las que además se han sumado los resultados del experimento gemelo Virgo, en Italia.

¿Por qué hablamos de una «nueva era» en astronomía? En cierto sentido, la mejor manera que tenemos los físicos de explorar las leyes fundamentales de la naturaleza consiste en hacer chocar objetos a energías muy elevadas y analizar qué ocurre. Así sucede en los aceleradores de partículas, como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, donde se hacen colisionar

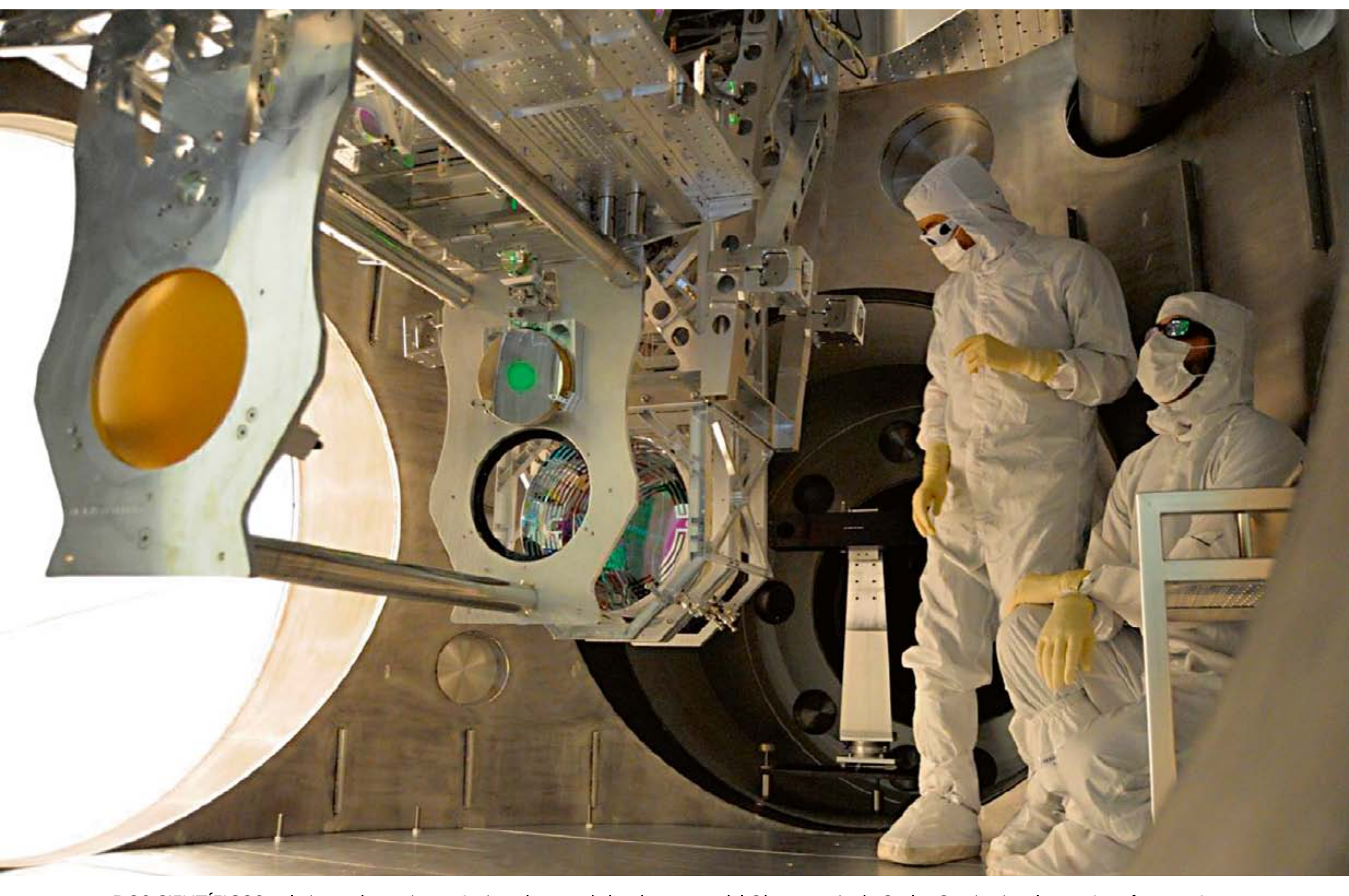
EN SÍNTESIS

Desde 2015, los experimentos LIGO, en Estados Unidos, y Virgo, en Italia, han venido detectando las ondas gravitacionales procedentes de lo que parecen ser colisiones de agujeros negros en galaxias distantes.

Sin embargo, varios estudios recientes han argumentado que dichas señales podrían provenir de objetos muy distintos de los agujeros negros. Las posibles diferencias aparecerían en forma de ciertos «ecos» en la parte final de las ondas detectadas.

Tales astros podrían ser estrellas de bosones, estrellas de gravedad o agujeros de gusano, entre otras alternativas. De confirmarse, el descubrimiento supondría una revolución de dimensiones copernicanas en la comprensión de la gravedad.

PÁGINAS ANTERIORES: MIKEL RODRÍGUEZ HIDALGO



DOS CIENTÍFICOS trabajan en las mejoras técnicas de unos de los detectores del Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO) en agosto de 2017. En los últimos años, varios autores han argumentado que las señales captadas por este tipo de experimentos deberían poder usarse para poner a prueba la existencia de horizontes de sucesos, el elemento característico de los agujeros negros.

CALTECH/INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS/LABORATORIO LIGO

protones a velocidades muy próximas a la de la luz. Al estudiar las propiedades de las partículas y la radiación emitidas en esos choques, podemos poner a prueba las leyes que describen los constituyentes elementales de la materia. Algo muy parecido sucede con las colisiones de agujeros negros. Por supuesto, tales cataclismos no se producen en laboratorios terrestres, pero sí ocurren de forma natural a lo largo y ancho del universo. Y, al igual que en los aceleradores de partículas, la posibilidad de analizar la radiación gravitatoria procedente de esos choques nos permite estudiar con detalle las propiedades de los objetos que colisionaron.

De hecho, la primera pregunta que deberíamos plantearnos es: ¿se trata realmente de agujeros negros? Desde hace tiempo, diversos trabajos teóricos han sugerido que los astros que habitualmente consideramos agujeros negros podrían ser objetos mucho más exóticos. Estos generarían un campo gravitatorio externo muy similar al de los agujeros negros, pero, al ser examinados más de cerca, revelarían diferencias notables. ¿Pueden las observaciones de los experimentos LIGO y Virgo distinguir entre las distintas posibilidades?

En los últimos tres años, varios investigadores hemos argumentado que la respuesta a dicha pregunta podría ser afirmativa. Aunque los datos experimentales no son aún concluyentes, todo indica que la cuestión podrá zanjarse durante los próximos años. Por primera vez en la historia, nos hallamos en condiciones de responder experimentalmente a una cuestión clave que hasta ahora se hallaba restringida a la pura especulación teórica. En caso de que se demostrase que las ondas gravitacionales observadas por LIGO y Virgo no proceden de agujeros negros, sino de astros de otro tipo, el descubrimiento supondría una revolución de primer orden en nuestra comprensión de la gravedad y de las leyes físicas.

¿NUEVA FÍSICA EN EL HORIZONTE?

Para poder afrontar la pregunta sobre la verdadera naturaleza de los objetos observados por los experimentos LIGO y Virgo, lo primero que hemos de hacer es calcular en qué se diferenciarían las ondas gravitacionales producidas por agujeros negros genuinos y aquellas generadas por astros exóticos de otra clase. La característica principal de un agujero negro es la existencia de un horizonte de sucesos, la superficie que no permite que ninguna señal escape al exterior. Así pues, la cuestión de si existen o no los agujeros negros resulta equivalente a la pregunta de si existen o no los horizontes de sucesos.

TEORÍA

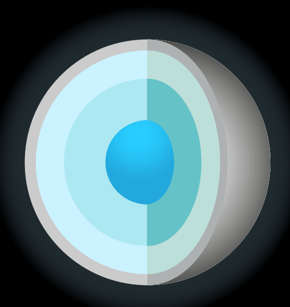
Alternativas a los agujeros negros

Los agujeros negros constituyen una de las soluciones más sencillas de las ecuaciones de la gravedad de Einstein. Aunque la mayoría de los investigadores creen en su existencia, sus propiedades parecen ser incompatibles con las de la mecánica cuántica, por lo que a lo largo de los años se han propuesto varias alternativas. Estas describen objetos que, aunque desde el exterior serían muy similares a un agujero negro, carecerían de un horizonte de sucesos, la superficie más allá de la cual nada puede escapar. A continuación se resumen algunas de las opciones más representativas.

«Bolas de pelusa»

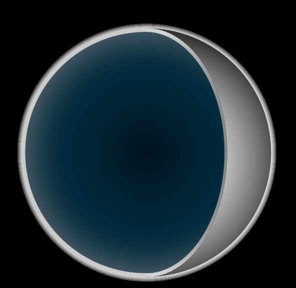
Se trata de un tipo de objeto predicho por la teoría de cuerdas. Su campo gravitatorio externo sería muy similar al de un agujero negro, pero al acercarnos a lo que sería el horizonte se abriría una quinta dimensión. En ese espacio habitarían las cuerdas, razón por la que en inglés reciben el nombre de *fuzballs*, que puede traducirse como «bolas de pelusa» o simplemente «pelusos».

Estrellas de bosones



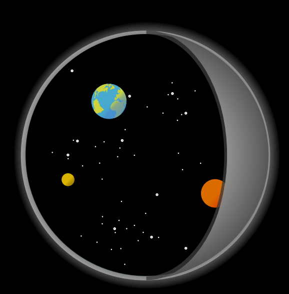
Estos hipotéticos astros serían parientes cercanos de las estrellas de neutrones. Si estas últimas se sustentan gracias a la presión ejercida por los neutrones de su interior, en el caso de una estrella de bosones sería la presión de otro tipo de partículas (de carácter bosónico, como el bosón de Higgs) lo que impediría el colapso gravitatorio del objeto.

Estrellas de gravedad



Este tipo de astros tendrían una región exterior y una interior en las que la gravedad se comportaría de manera muy diferente. En la zona externa la gravedad exhibiría las propiedades habituales. En la interna, sin embargo, la propia gravedad generaría una presión negativa (un comportamiento similar al de la energía oscura) que evitaría la formación de un horizonte de sucesos.

Agujeros de gusano



En lugar de un horizonte, estos objetos presentarían un «túnel» que conectaría dos partes alejadas del universo o incluso dos universos distintos. Muy populares en la ciencia ficción, su existencia sigue siendo especulativa. Según varias consideraciones teóricas, para que pudieran formarse haría falta un tipo de materia con propiedades exóticas cuya existencia resulta controvertida.

MIKEL RODRÍGUEZ HIDALGO

En 2016, pocos meses después de que se anunciara la primera detección de una onda gravitacional, un trabajo firmado por Vitor Cardoso, del Instituto Superior Técnico de Lisboa, y otros investigadores señaló que los resultados de LIGO podrían usarse para poner a prueba la existencia de horizontes de sucesos. La idea básica consiste en buscar ciertos «ecos» en la señal detectada: un patrón característico que aparecería en la parte final de la onda.

Las ondas gravitacionales registradas por LIGO y Virgo proceden de las colisiones entre astros decenas de veces más masivos que el Sol. Tras chocar, los dos objetos se fusionan en uno. La última parte de la señal detectada corresponde a las vibraciones del nuevo astro que se ha formado tras la colisión. Si este es un agujero negro, la señal debería extinguirse por completo poco después; en cierto sentido, podemos decir que el horizonte «se traga» el resto de las vibraciones. Sin embargo, si el supuesto horizonte exhibiese algún tipo de estructura, al cabo de cierto tiempo recibiríamos un primer «eco» de la señal inicial. Tales ecos se repetirían a intervalos más o menos regulares y su intensidad iría disminuyendo poco a poco. Así pues, la presencia de ecos en las señales detectadas por LIGO y Virgo supondría una prueba casi definitiva de que los astros que pensábamos que eran agujeros negros corresponden, en realidad, a otra clase de objetos compactos sin horizonte.

La pregunta sobre la existencia de horizontes de sucesos es totalmente legítima desde un punto de vista científico, pues, como vemos, resulta posible ponerla a prueba mediante el experimento. Pero ¿hay realmente motivos para pensar que los horizontes —y, por tanto, los agujeros negros— tal vez no existan? Como mencionábamos al principio, los agujeros negros aparecen de forma natural como soluciones de la teoría de la relatividad general. En cambio, otro tipo de objetos compactos son más bien especulaciones teóricas. ¿Por qué darles crédito en detrimento de los agujeros negros?

La respuesta es que la teoría de la relatividad general resulta incompatible con la mecánica cuántica. En concreto, la existencia de horizontes de sucesos plantea serios problemas debido a lo que se conoce como «paradoja de la información», un enigma que se remonta a las investigaciones de Stephen Hawking en los años setenta y que viene ocupando a los físicos teóricos desde entonces. En términos muy simplificados, el origen de la paradoja es el siguiente. Un postulado elemental de la mecánica cuántica afirma que la información de un sistema físico siempre se conserva. Sin embargo, la presencia de un

horizonte de sucesos parece violar dicho principio, ya que la información asociada a un objeto que cayese en el interior de un agujero negro se perdería para siempre.

Lo anterior ha llevado a algunos investigadores a conjeturar que los efectos cuánticos de la gravedad podrían impedir la formación de horizontes de sucesos. Como consecuencia, el astro resultante de un proceso de colapso gravitatorio no sería un agujero negro, sino un objeto sin horizonte que, como tal, evitaría la pérdida de información. Entre las posibles alternativas a los agujeros negros se han propuesto las «bolas de pelusa» (*fuzzballs*, cierto tipo de objetos predichos por la teoría de cuerdas), las estrellas de bosones (astros parecidos a las estrellas de neutrones pero sustentados por partículas similares al bosón de Higgs), las estrellas de gravedad (*gravastars*, en cuyo interior la propia gravedad generaría una presión negativa que evitaría la formación de un horizonte) o los más populares agujeros de gusano («atajos» espaciotemporales que comunicarían dos regiones distantes del universo). En los últimos años, el problema de reconciliar la mecánica cuántica con la física de los agujeros negros ha llevado a postular incluso otras modificaciones del horizonte de sucesos, como los denominados «muros de fuego», una región de alta energía que rodearía al astro [*véase* «Agujeros negros y muros de fuego», por Joseph Polchinski; Investigación y Ciencia, abril de 2015].

Hemos de advertir de que tales propuestas son radicales y muy especulativas. No obstante, el hecho de que podamos ponerlas a prueba por medio del experimento las hace dignas de consideración. Dado que nadie sabe qué tipo de objeto sin horizonte podría sustituir a un agujero negro, las investigaciones al respecto han considerado distintos modelos sencillos de estos astros hipotéticos.

ECOS DESDE LA GARGANTA

Todos los objetos alternativos que hemos mencionado producirían ecos gravitacionales. El problema radica en que, aunque tales ecos estén presentes en las señales detectadas por LIGO y Virgo, estas vienen siempre acompañadas por una gran cantidad de ruido de fondo, lo que enmascara el patrón que buscamos. Para identificarlo, hemos de determinar primero qué forma tendrá dicho patrón. Así pues, el primer paso consiste en caracterizar el tipo de ecos gravitacionales que generarían los diferentes objetos exóticos sin horizonte.

> La existencia de horizontes de sucesos plantea serios problemas debido a lo que se conoce como «paradoja de la información» de los agujeros negros

El trabajo original de Cardoso y sus colaboradores proponía varios modelos sencillos de objetos con simetría esférica. Desde entonces, se ha producido un gran avance en la caracterización de los ecos generados por astros de este tipo. En 2017, un estudio de Zachary Mark, del Instituto de Tecnología de California, y otros autores presentó un método genérico para calcular los ecos emitidos por cualquier objeto con simetría esférica. No obstante, esta suposición adolece de un inconveniente: la simetría esférica implica que el objeto en cuestión no puede rotar sobre sí mismo (ya que toda rotación tiene lugar en torno a un eje determinado, lo que rompe dicha simetría). Sin embargo, sabemos que cuando dos astros chocan y se fusionan, la colisión ocurre tras una fase en la que ambos orbitan rápidamente en espiral en torno al centro de masas común. Como consecuencia, el objeto resultante se halla siempre en rápida rotación.

Para superar tales dificultades, en un trabajo publicado el año pasado junto con Frederik Goelen, Thomas Hertog y Bert Vercnocke, de la Universidad Católica de Lovaina, consideramos el efecto que tendría la rotación en la forma de los ecos. Para ello nos centramos en el caso de los agujeros de gusano. En lugar de un horizonte de sucesos, estos objetos tendrían lo que los físicos denominan una «garganta»: una especie de túnel que conecta dos regiones distantes del universo. Aunque hipotéticos, los agujeros de gusano presentan una ventaja. No es necesario hacer ninguna suposición sobre su estructura interna, ya que lo que debería ser su «interior» es en realidad una zona exterior similar a la que conecta con la garganta. En concreto, nuestro trabajo consideró una clase de agujeros de gusano en rotación que, para un observador externo, serían muy parecidos a un agujero negro.

Para caracterizar los ecos generados por estos agujeros de gusano, calculamos sus modos cuasinormales, el equivalente a las «notas principales» que produce un sistema disipativo (uno que pierde energía con el tiempo). Cada uno de esos modos viene caracterizado por una frecuencia (el «tono» de la nota) y por el tiempo característico que esta tarda en extinguirse. Como analogía, consideremos que le damos un martillazo a una campana. Esta comenzará a vibrar y emitirá un sonido que, poco a poco, se irá desvaneciendo. Si conocemos todos los modos cuasinormales de la campana, podremos deducir el sonido que emitirá al golpearla. De igual modo, si sabemos cuáles son los modos cuasinormales de un agujero de gusano (o de cualquier otro tipo de objeto compacto), podremos determinar la forma de las ondas gravitacionales que generará.

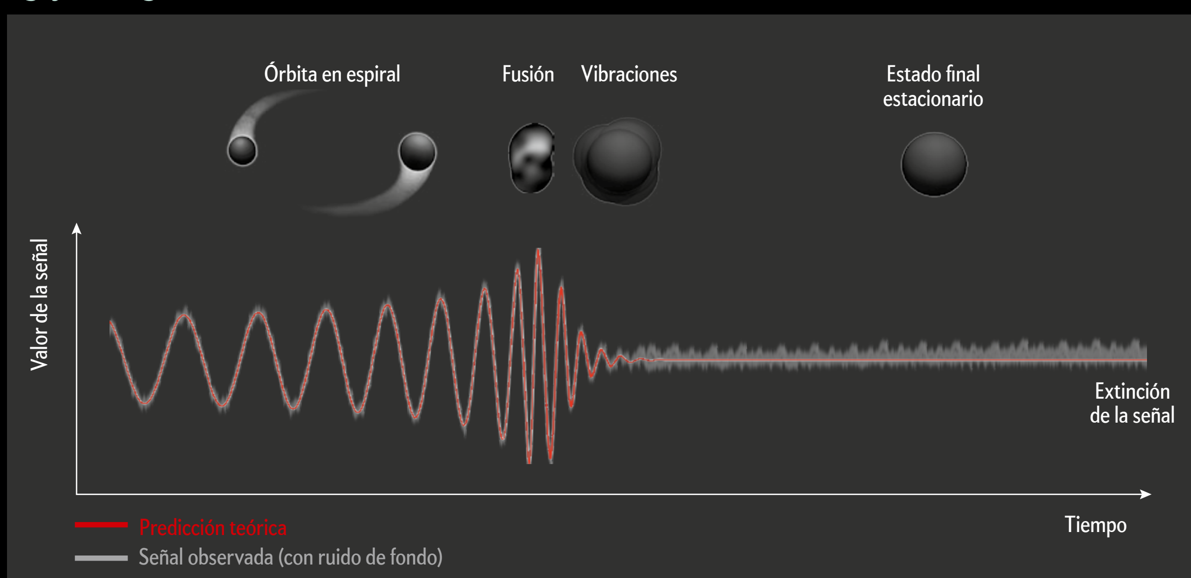
Nuestro trabajo halló que las frecuencias cuasinormales de los agujeros de gusano son muy distintas de las de un agujero negro. Sin embargo, los modos que más se excitan en los ecos son aquellos más cercanos al modo fundamental (el más relevante) del agujero negro. Esto último constituye una predicción con-

Cómo desenmascarar a un impostor

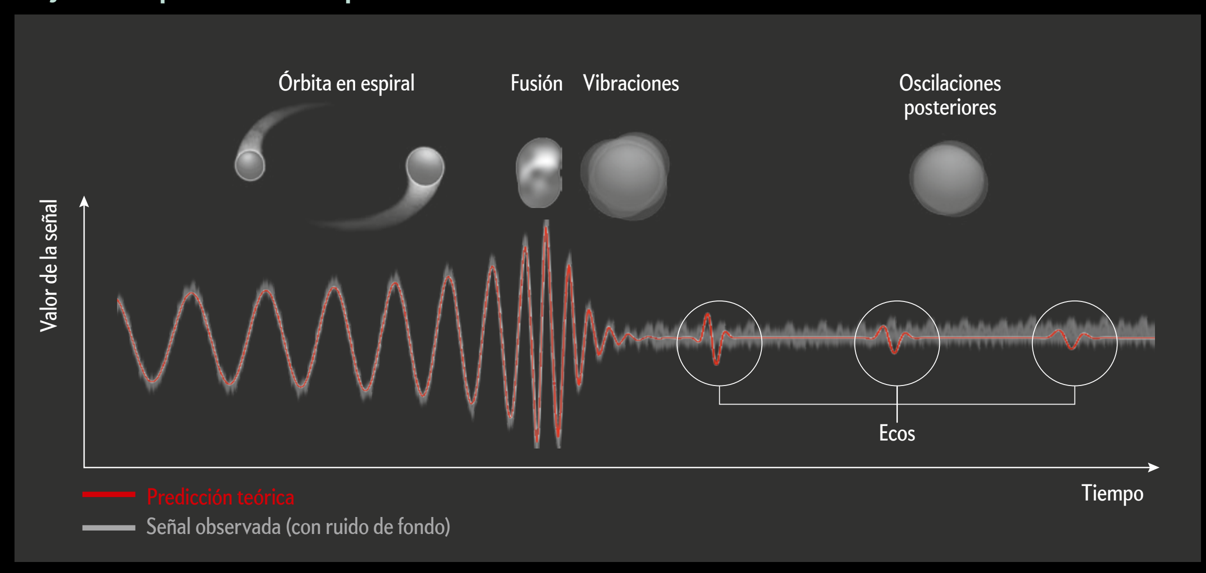
Las ondas gravitacionales procedentes de las colisiones de objetos compactos presentan tres regímenes diferenciados, cada uno de pocas fracciones de segundo de duración. El primero corresponde a la situación previa al choque, en la que ambos astros orbitan rápidamente en espiral en torno al centro de masas común. El segundo refleja la fusión de ambos objetos en uno solo, mientras que el último procede de las vibraciones del nuevo astro que se ha formado tras la colisión.

Si el objeto resultante fuese un agujero negro, la señal debería extinguirse por completo justo después, ya que el horizonte de sucesos «engulliría» todas las oscilaciones posteriores (*arriba*). Sin embargo, si el supuesto horizonte exhibiese algún tipo de estructura, al cabo de cierto tiempo comenzarían a observarse «ecos» atenuados de la señal inicial (*abajo*). Su detección supondría una prueba casi definitiva de que el objeto final no es un agujero negro.

Agujeros negros



Objetos compactos de otro tipo



¿Qué dicen los datos?

Varios estudios recientes han apuntado que los resultados obtenidos hasta ahora por los experimentos LIGO y Virgo serían compatibles con la existencia de ecos. Por el momento, la presencia de ruido de fondo impide distinguir entre ambas posibilidades, pero los datos futuros deberían permitir zanjar la cuestión.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

> Algunos autores afirman que un tratamiento estadístico apropiado de las señales de LIGO y Virgo ya revela la existencia de ecos

creta que podría ponerse a prueba experimentalmente y usarse como guía para caracterizar las señales. De hecho, esta propiedad nos permite establecer un algoritmo sencillo para modelizar la forma que tendrían los ecos gravitacionales. Aunque nuestro análisis se centra en el caso de los agujeros de gusano, la construcción puede extenderse a cualquier tipo de objeto exótico suficientemente compacto.

Al mismo tiempo, nuestro estudio considera por primera vez los efectos de la rotación en la señal. Estos son fundamentalmente dos: el «desdoblamiento» de las frecuencias características y la aparición de modos inestables. El primer fenómeno es similar al efecto Zeeman de la física atómica (la separación de las líneas espectrales de un átomo en presencia de un campo magnético). Quiere decir que, en ausencia de rotación, hay modos de vibración distintos que, por coincidencia, tienen la misma frecuencia. Sin embargo, cuando el objeto rota, esa coincidencia desaparece y las frecuencias se separan, lo que produciría efectos observables. Por su parte, la aparición de modos inestables implica que hay modos de vibración cuya magnitud crece con el tiempo en lugar de desvanecerse. No obstante, según nuestro cálculo, tales modos serían inobservables en la práctica.

SEÑAL Y RUIDO

Una limitación de nuestro estudio es que no proporciona la forma exacta de la onda gravitacional, sino la de otro tipo de onda conocida como «perturbación escalar», correspondiente al comportamiento de una partícula de prueba en el espaciotiempo que estamos considerando. Ello se debe a que calcular la forma precisa de las ondas gravitacionales generadas por objetos en rotación que no son agujeros negros constituye un problema de enorme complejidad que aún no está resuelto, por lo que este ha sido el enfoque adoptado hasta ahora por la mayoría de los investigadores. La idea es que las propiedades cualitativas de la señal que estamos analizando deberían quedar plasmadas en dicha aproximación. Con todo, esta dificultad deberá ser abordada si queremos deducir exactamente el patrón que veremos en los detectores.

Otra posibilidad consiste en ser agnóstico sobre el objeto que genera los ecos y tratar de describirlos de forma sistemática, como el año pasado hicieron Qingwen Wang y Niayesh Afshordi, del Instituto Perimeter de Física Teórica, en Waterloo. Aunque este método es más sencillo y práctico, también nos proporciona menos información, pues significa que, aunque detectemos los ecos, no sabremos con precisión a qué tipo de objeto corresponden.

Es importante señalar que la mayoría de alternativas propuestas a los agujeros negros, incluidos los agujeros de gusano, presentan algún tipo de dificultad. Entre ellas, la ausencia de modelos dinámicos que nos digan cómo se forman; la necesidad de incluir materia con propiedades exóticas para explicar su existencia; o problemas de estabilidad de la solución. Todo ello hace que la impresión mayoritaria entre la comunidad científica sea que la existencia de ecos resulta muy improbable. A pesar de que los agujeros negros también representan desafíos teóricos importantes, sobre todo en situaciones en las que la mecánica cuántica desempeña un papel relevante, la mayoría de los expertos esperan que las señales detectadas por LIGO y Virgo sean plenamente compatibles con ellos. Sin embargo, la posibilidad de poner a prueba esta hipótesis hace imperativo considerar modelos alternativos.

Sorprendentemente, algunos autores, como Afshordi y sus colaboradores, aseguran que los ecos ya han sido detectados. Afirman que un tratamiento estadístico apropiado de las señales registradas por LIGO y Virgo revela que dichos ecos aparecen en todos los eventos observados hasta ahora. Otros investigadores, incluidos algunos de la propia colaboración LIGO, han planteado dudas sobre semejante conclusión, aunque hasta ahora no han podido refutarla de manera definitiva. En este sentido, es importante subrayar que LIGO y Virgo emplean complejísimos dispositivos y procedimientos para eliminar el ruido de fondo que empaña las señales, por lo que determinar si los presuntos ecos han sido detectados ya o no constituye una tarea extremadamente complicada.

En todo caso, en lo que sí parece haber consenso es en que la existencia de ecos podrá confirmarse o refutarse de forma casi definitiva en los próximos años. Ello será posible toda vez que LIGO y Virgo hayan acumulado más datos, mejoren la precisión de sus dispositivos y una nueva generación de detectores entre en funcionamiento. Por primera vez, nos hallamos ante las puertas de responder empíricamente a una de las preguntas más fundamentales sobre la naturaleza de la gravedad. Una respuesta contraria a las expectativas supondría una revolución de dimensiones copernicanas.

PARA SABER MÁS

Gravitational-wave signatures of exotic compact objects and of quantum corrections at the horizon scale. Vitor Cardoso et al. en *Physical Review D*, vol. 94, art. 084031, octubre de 2016.

A recipe for echoes from exotic compact objects. Zachary Mark et al. en *Physical Review D*, vol. 96, art. 084002, octubre de 2017.

Echoes from the abyss: Tentative evidence for Planck-scale structure at black hole horizons. Jahed Abedi, Hannah Dykaar y Niayesh Afshordi en *Physical Review D*, vol. 96, art. 082004, octubre de 2017.

Echoes of Kerr-like wormholes. Pablo Bueno, Pablo Cano et al. en *Physical Review D*, vol. 97, art. 024040, enero de 2018.

Black hole echology: The observer's manual. Qingwen Wang y Niayesh Afshordi en *Physical Review D*, vol. 97, art. 124044, junio de 2018.

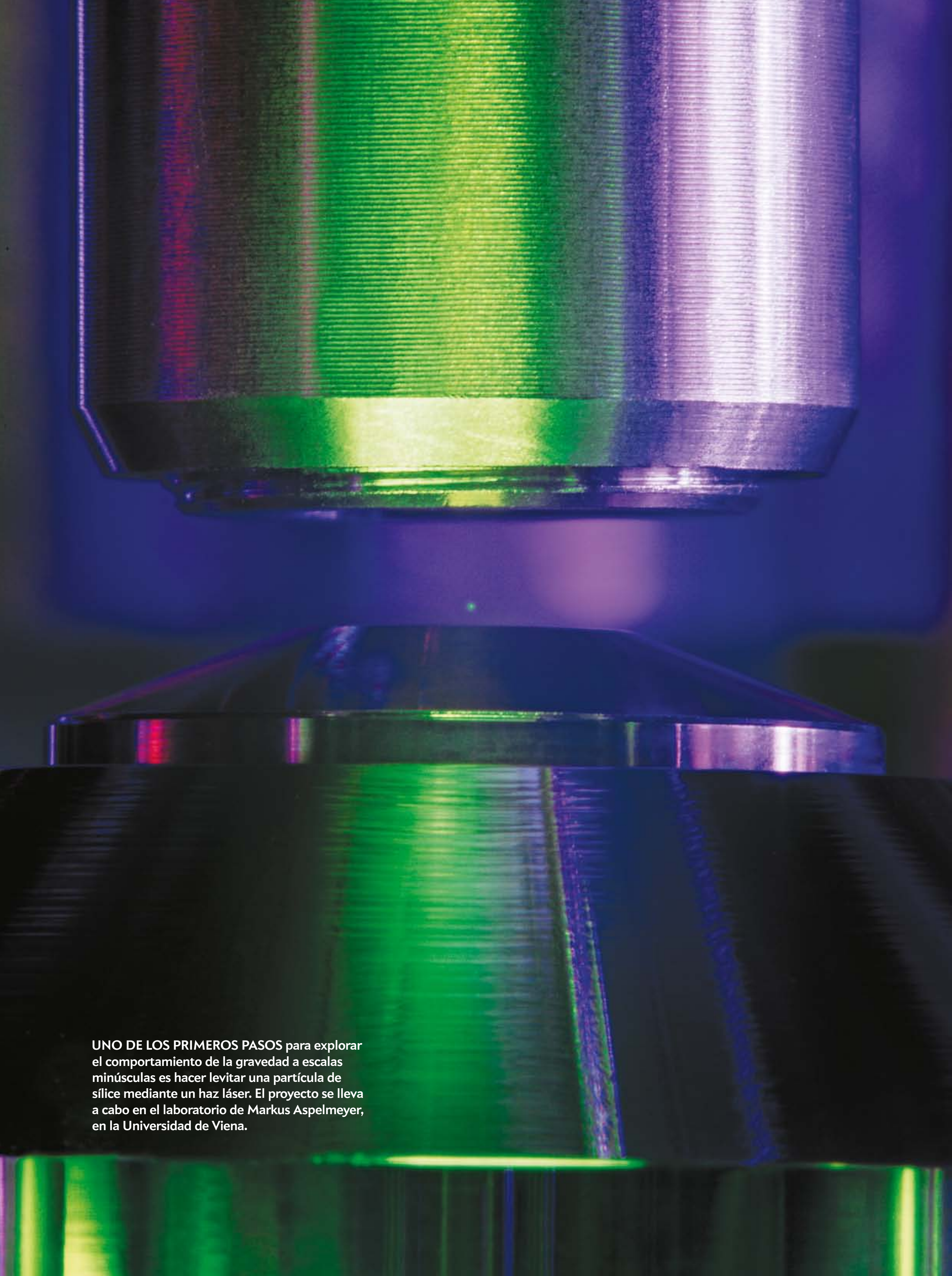
EN NUESTRO ARCHIVO

Singularidades desnudas. Pankaj S. Joshi en *IyC*, abril de 2009.

La prueba del agujero negro. Dimitrios Psaltis y Sheperd S. Doeleman en *IyC*, noviembre de 2015.

La observación de ondas gravitacionales con LIGO. Alicia M. Sintes y Borja Sorazu en *IyC*, febrero de 2017.

Las teorías de la gravedad tras la tormenta cósmica. Miguel Zumalacárregui Pérez en *IyC*, junio de 2018.



UNO DE LOS PRIMEROS PASOS para explorar el comportamiento de la gravedad a escalas minúsculas es hacer levitar una partícula de sílice mediante un haz láser. El proyecto se lleva a cabo en el laboratorio de Markus Aspelmeyer, en la Universidad de Viena.

FÍSICA CUÁNTICA

GRAVEDAD CUÁNTICA EN EL LABORATORIO

Varias propuestas recientes ofrecen una senda para poner a prueba experimentalmente la naturaleza cuántica de la gravedad

Tim Folger

FOTOGRAFÍAS DE MATTIA BALSAMINI

EN SÍNTESIS

Durante largo tiempo, muchos físicos han pensado que las propiedades cuánticas de la gravedad solo serían accesibles experimentalmente al sondear la escala de Planck, un régimen de energías imposible de alcanzar en la práctica.

En los últimos años varias propuestas han sugerido un ingenioso camino alternativo: medir los efectos del campo gravitatorio generado por masas diminutas en las que previamente se haya inducido un estado de superposición cuántica.

Tales experimentos no requerirían grandes energías, pero sí una precisión abrumadora y un control sin precedentes sobre los sistemas cuánticos implicados. Con todo, podría tratarse de una meta factible a medio o largo plazo.

Tim Folger es periodista científico. Escribe para *National Geographic*, *Discover* y otras publicaciones y es editor de la serie *The best American science and nature writing*, una antología anual publicada por Houghton Mifflin Harcourt.



EN 1797, HENRY CAVENDISH, UNO DE LOS CIENTÍFICOS más prominentes de Gran Bretaña, construyó un artilugio para pesar el mundo. Por aquel entonces no se conocía la masa de la Tierra, ni tampoco su composición. ¿Constaba sobre todo de roca sólida? ¿Variaba con la profundidad? El astrónomo Edmond Halley llegó a plantear que nuestro planeta podía estar hueco. Isaac Newton había comparado la masa de la Tierra con la de otros cuerpos del sistema solar y dedujo que era mayor que la de la Luna. Incluso había propuesto un método para determinar su masa absoluta: medir con gran precisión la atracción gravitatoria entre dos masas esféricas y usar el resultado para deducir la masa de la Tierra. Pero Newton desechó de inmediato la idea, ya que pensó que la atracción entre las esferas sería demasiado pequeña para detectarla, incluso usando masas impracticablemente grandes. «No, ni con montañas enteras bastaría para producir efectos perceptibles», escribió en su obra maestra, los *Principia*, donde presentó sus leyes del movimiento y de la gravitación.

Un día de agosto de más de un siglo después, Cavendish demostró que Newton se equivocaba. El instrumento que había construido en un cobertizo situado en su propiedad del suroeste de Londres constaba de dos bolas de plomo de 730 gramos. Estas se hallaban unidas a los extremos de una barra de madera de 1,8 metros de largo, la cual colgaba de un cable sujeto a una viga. Dos esferas de plomo mucho mayores, de casi 160 kilogramos cada una, estaban suspendidas de manera independiente a unos 23 centímetros de las primeras. Cavendish esperaba que la atracción gravitatoria que ejercían las esferas grandes sobre las pequeñas hiciera girar levemente la barra de madera. Y acertó: se movió unos cuatro milímetros.

Aquello le permitió medir directamente la fuerza gravitatoria ejercida por las esferas de mayor tamaño sobre las pequeñas. Dado que el británico conocía la fuerza que ejercía la Tierra sobre cada una de estas últimas (en el sistema de unidades inglés, tanto las masas como las fuerzas se miden en libras, de modo que, por definición, la fuerza gravitatoria que experimenta una masa de una libra en la superficie de la Tierra es de una libra-fuerza), pudo establecer una sencilla relación: la fuerza gravitatoria entre la esfera pequeña y la grande, comparada con la fuerza gravitatoria entre la esfera pequeña y la Tierra. Y, dado que la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos es directamente proporcional a sus masas, esa relación le sirvió para deducir la masa de la Tierra. A lo largo de nueve meses, repitió el experimento 17 veces y concluyó que la Tierra debía tener una masa de unos seis cuatrillones de kilogramos, un resultado que básicamente coincide con los mejores cálculos modernos.

«Es una historia increíble», sentencia Markus Aspelmeyer tras relatar el experimento de Cavendish durante una llamada de Skype. «Fue el primer experimento de laboratorio de precisión [relacionado con la gravedad].» La proeza que logró Cavendish hace 220 años, aunque en realidad no se llevara a cabo en un laboratorio, constituye una fuente de inspiración para Aspelmeyer, físico de la Universidad de Viena. Al igual que Cavendish, pretende llevar a cabo un experimento ambicioso y en apariencia imposible que podría transformar nuestra comprensión de la gravedad. Desea usar un pequeño montaje —tanto que cabría en una mesa de su laboratorio— para hallar pruebas de la naturaleza cuántica de la gravedad.

De las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza, la gravedad es la única que no se deja describir bien mediante





CIRCUITOS SUPERCONDUCTORES (*1*) usados en un experimento de levitación en la Universidad de Viena. Con vistas a comprobar el comportamiento cuántico de la gravedad, los investigadores también intentan medir el campo gravitatorio generado por esferas de oro de tamaño milimétrico (*2*).

las leyes de la física cuántica, la teoría que se aplica a todas las demás fuerzas y partículas conocidas. El electromagnetismo, la interacción nuclear fuerte (que mantiene unidos a los núcleos atómicos) y la débil (responsable de las desintegraciones radiactivas) son intrínsecamente cuánticas, lo que deja a la gravedad como un misterioso y único caso aparte.

Ese carácter excepcional de la gravedad ha venido frustrando a los físicos desde hace décadas. La mayoría de quienes hoy trabajan en este problema creen que la unificación entre la gravedad y la física cuántica podría observarse al examinar el universo a distancias del orden de la escala de Planck, una unidad fundamental de longitud equivalente a unos 10^{-35} metros. Esta distancia es tan minúscula (unos diez cuatrillones de veces menor que un átomo de hidrógeno) que se cree que, en ella, el propio espaciotiempo debería manifestar sus propiedades cuánticas.

Un espaciotiempo cuántico podría ser algo muy distinto del suave tejido continuo que describe la relatividad general, algo así como una fotografía digital que se ve pixelada al aumentarla. Pero ¿en qué consistiría exactamente un cuanto de espaciotiempo? ¿Cómo medir el tiempo o la distancia si el espacio y el tiempo «se fracturan»?

«Todas nuestras teorías físicas requieren, de manera implícita o explícita, la existencia de varas de medir y de relojes: algo ocurrió [aquí] en este instante y luego esto otro [allí] en un momento posterior», comenta Miles Blencowe, físico teórico en el Colegio Universitario de Dartmouth. «¿Por dónde empezamos si ni siquiera tenemos parámetros de tiempo o de distancia?», continúa. Lajos Diósi, físico teórico en el Centro de Investigaciones Físicas Wigner de Budapest, resume el problema en estos términos: «No sabemos qué encontraremos al descender a la escala de Planck, pero podemos estar seguros de que se producirá un completo desbarajuste en la continuidad del espaciotiempo».

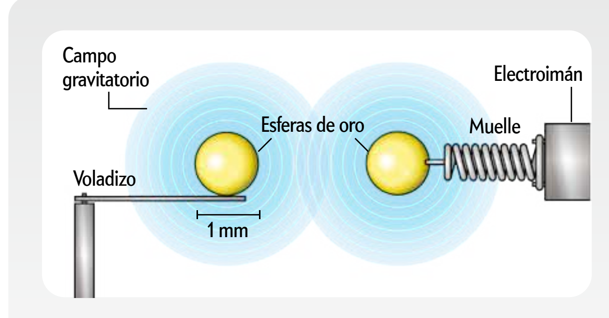
Pero, por desgracia para los físicos, no hay manera de observar qué fenómenos ocurren a la escala de Planck, lo que impide verificar las predicciones de las diferentes teorías de gravedad cuántica para dilucidar cuál podría ser la correcta. «No es que no tengamos teorías de gravedad cuántica», explica Carlo Rovelli, físico teórico de la Universidad de Aix-Marsella. «El problema es que tenemos más de una.»

En física, cuanto menores son las distancias que queremos explorar, mayor debe ser la energía del experimento diseñado para examinarlas. Para analizar la escala de Planck necesitaríamos un instrumento 15 órdenes de magnitud más potente que el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, cerca de Ginebra, que con un anillo de 27 kilómetros es el mayor acelerador de partículas jamás construido. Como apunta un físico, un colisionador capaz de explorar la escala de Planck debería tener un tamaño similar al de la Vía Láctea.

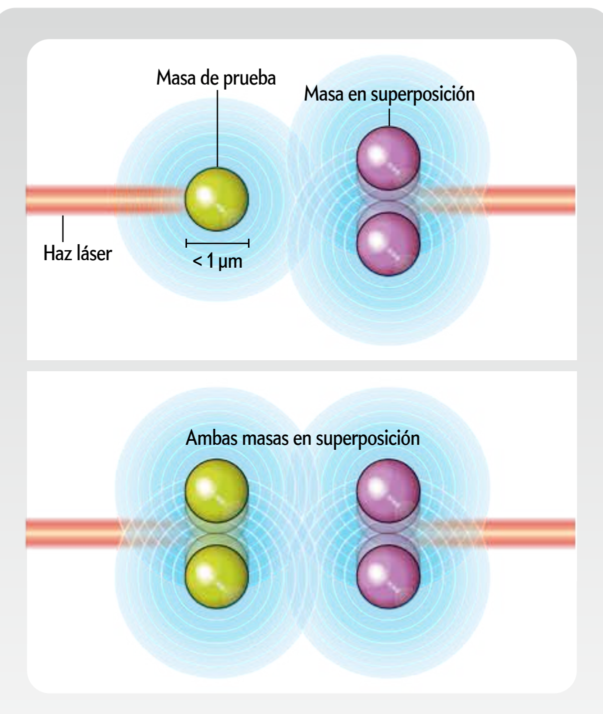
Los instrumentos como el LHC hacen chocar partículas a velocidades muy próximas a la de la luz, y los físicos esperan

La gravedad en un sistema cuántico

A fin de obtener pruebas experimentales del comportamiento cuántico de la gravedad, varios grupos están investigando la manera de medir los efectos del campo gravitatorio generado por pequeñas masas con propiedades cuánticas. Tales efectos incluyen la superposición (la capacidad de un sistema cuántico de quedar descrito por dos estados distintos a la vez) y el entrelazamiento (la posibilidad de «coordinar» las propiedades de dos partículas de un modo imposible de conseguir en sistemas clásicos). A continuación se describen dos propuestas recientes.



EXPERIMENTO PRELIMINAR N.° 1
Un experimento ideado por Markus Aspelmeyer, de la Universidad de Viena, intentará medir el campo gravitatorio de una masa descrita por una superposición de dos estados de posición. Como paso previo, los investigadores desarrollarán la tecnología necesaria para detectar el campo gravitatorio de masas minúsculas; en este caso, dos esferas de oro. Un electroimán conectado a un muelle hará que vibre una de ellas. La otra, unida al extremo de un voladizo micromecánico, debería oscilar en respuesta a los cambios en la atracción gravitatoria ejercida por su compañera.



EXPERIMENTO N.° 1
En última instancia, el equipo de Aspelmeyer pretende llevar una de las esferas (*lila*) a un estado de superposición de dos posiciones distintas (*arriba*). Si la gravedad es cuántica, el campo gravitatorio creado por dicha esfera también debería quedar descrito por una superposición, lo que a su vez tendría que inducir un estado de tales características en la masa de prueba (*verde, abajo*). Para poder inducir dichos efectos cuánticos, las masas deberán ser menores que en el experimento preliminar, lo que obligará a usar haces láser para suspenderlas.

que algo nuevo surja de los restos de esas colisiones. No se trata de una idea muy distinta a volar una caja fuerte para sacar lo que hay dentro. Por su parte, quienes se decantan por emplear pequeños experimentos de laboratorio apuestan por una estrategia distinta, basada en la sutileza en vez de en la fuerza bruta, como ladrones que acercan el oído para oír el clic de la cerradura. «Se trata de renunciar a una energía elevada en favor de una precisión elevada», apunta Eric Adelberger, físico en la Universidad de Washington. «Tenemos la frontera energética y la frontera de la precisión. Si logramos medir algo realmente bien, es posible inferir qué procesos tendrán lugar a energías muy elevadas.» Al menos tres grupos, incluido el de Aspelmeyer, están diseñando experimentos de este tipo. Los científicos son optimistas y creen que acabarán alcanzando el nivel de precisión requerido para explorar el dominio en el que la gravedad revela sus propiedades cuánticas.

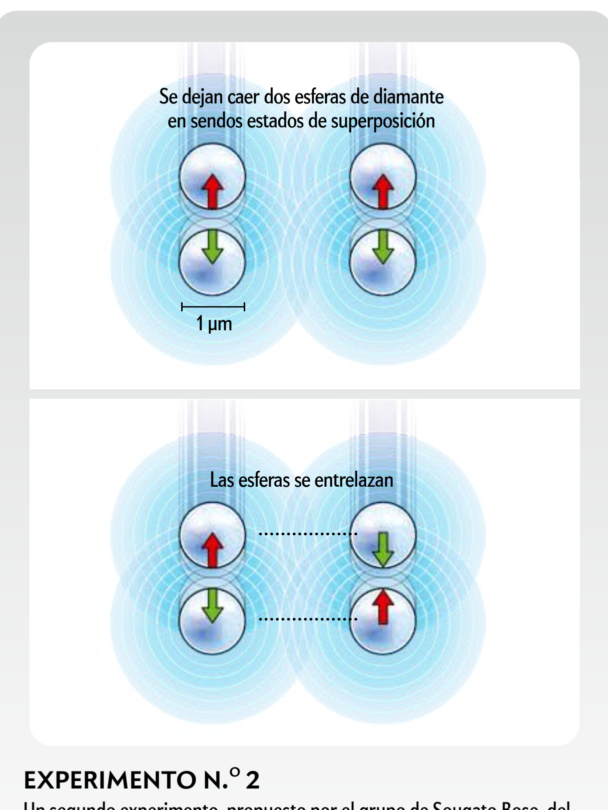
EL EXPERIMENTO MENTAL DE FEYNMAN

Para entender por qué una gran precisión permite acceder de manera indirecta a lo que ocurre a altas energías, o a cortas distancias, consideremos una analogía histórica: el movimiento browniano. En un artículo publicado en 1905, Einstein demostró que el temblor aleatorio de los granos de polen suspendidos en el agua podía explicarse a partir de las colisiones con las moléculas del líquido. Ello fue posible a pesar de que estas eran demasiado pequeñas —por muchos órdenes de magnitud— para observarlas de forma directa. De manera similar, Aspelmeyer y otros físicos confían en que los fenómenos que ocurren a la escala de Planck dejen su huella en experimentos de baja energía pero muy precisos. Y aunque no sea posible aumentar en varios órdenes de magnitud la potencia de los aceleradores de partículas (no parece probable que vayamos a ver colisionadores de mil kilómetros de largo), la precisión de los pequeños experimentos sí podría incrementarse en varias potencias de diez durante las próximas décadas.

Tales mejoras tal vez permitan poner a prueba la suposición de que la gravedad debería manifestar propiedades cuánticas. «Si eso ocurre, tendría que haber consecuencias para los fenómenos que suceden a una escala de energía mucho menor [que la escala de Planck]», señala Aspelmeyer. «La pregunta es: ¿podemos plantear experimentos capaces de examinar esas consecuencias?»

Lo que el físico tiene en mente es un experimento para medir la atracción gravitatoria entre dos masas esféricas. Sin embargo, y a diferencia de Cavendish, Aspelmeyer no pretende pesar la Tierra. Y sus masas, próximas al miligramo, son órdenes de

BEN GILLILAND



EXPERIMENTO N.° 2

Un segundo experimento, propuesto por el grupo de Sougato Bose, del Colegio Universitario de Londres, y por Chiara Marletto y Vlatko Vedral, de Oxford, consiste en dejar caer dos esferas de diamante, ambas en un estado de superposición (*arriba*). Si la distancia entre ellas es de unos 100 micrómetros, interaccionarán por medio de su atracción gravitatoria. Y si la gravedad es cuántica, dicha interacción debería causar que sus estados cuánticos (*flechas*) pasaran a estar entrelazados. En tal caso, las partículas exhibirían una serie de correlaciones (*abajo*) imposibles de explicar por medios clásicos.

magnitud más ligeras que las de las bolas de plomo de Cavendish. Lo que desea averiguar es si la gravedad interacciona con las propiedades cuánticas de las pequeñas masas. En concreto, busca investigar qué efectos gravitatorios generaría un objeto que se encontrase en dos lugares a la vez; es decir, en un estado cuántico análogo al del célebre gato de Schrödinger.

En el mundo cuántico, las partículas poseen la insólita capacidad de hallarse en una superposición de estados; por ejemplo, en dos estados asociados a posiciones distintas. Tales superposiciones se han observado numerosas veces en el laboratorio, pero son extremadamente delicadas: la interacción con cualquier partícula cercana puede hacer que se esfumen. Pero, mientras la superposición dure, Aspelmeyer se pregunta qué propiedades exhibirá el objeto. ¿Creará su propio campo gravitatorio? «Supongamos que llevamos un objeto a un estado de superposición. ¿Cómo gravita? Esa es la pregunta que deseamos responder.»

La idea fue propuesta como un experimento mental por Richard Feynman en una conferencia impartida en 1957. El célebre físico razonó que, si la gravedad realmente fuese un fenómeno cuántico, una partícula que se hallase en una superposición de dos posiciones distintas crearía dos campos gravitatorios diferentes. Según la teoría de la relatividad general, el campo gravitatorio es una distorsión del espacio y el tiempo. Así que, para una pequeña masa en superposición cuántica, coexistirían dos espaciotiempos uno al lado del otro, una situación que no debería darse en la teoría de Einstein.

Y si apareciese esa superposición en el espaciotiempo, ¿cómo interaccionaría con ella otro objeto? ¿Sentiría la atracción de los dos campos gravitatorios? ¿O tal vez, como creen algunos físicos, la interacción destruiría la superposición y daría lugar a una dinámica gravitatoria normal? Si la superposición persistiera y la masa de prueba interaccionara con ambos campos gravitatorios, eso haría que la masa de prueba y la masa en superposición se entrelazasen, un rasgo revelador de la mecánica que vincula de manera inextricable las propiedades de dos objetos. Feynman argumentó que un experimento de tales características demostraría que la gravedad, al igual que el resto de las interacciones fundamentales, es inherentemente cuántica.

Aunque un resultado semejante no validaría ninguna teoría de gravedad cuántica en particular, sí constituiría una prueba indirecta de que la gravedad está cuantizada. Y, de manera más general, proporcionaría indicios convincentes de que las leyes de la mecánica cuántica son válidas a todas las escalas, no solo en el dominio de los fotones, los átomos y las partículas elementales. Algunos físicos se han aferrado a la idea de que la mecánica cuántica podría venirse abajo a la hora de describir el mundo macroscópico. Roger Penrose, físico de la Universidad de Oxford, y Diósi han propuesto que la gravedad provocaría que las superposiciones se esfumasen en sistemas suficientemente grandes, lo que en la práctica separaría el mundo cuántico del clásico.

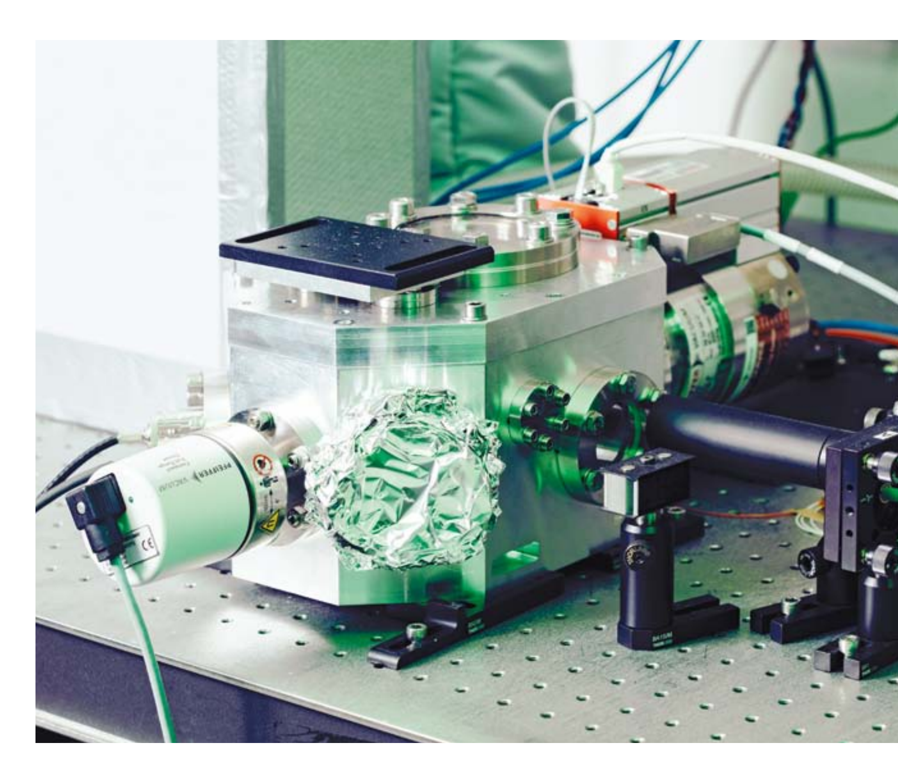
«Una de las áreas en las que se supone que fracasa la teoría cuántica es en la descripción de la gravedad», apunta Chiara Marletto, física teórica en Oxford. «Algunos eminentes científicos sostienen que será precisamente ahí donde deje de funcionar la teoría cuántica. Así que, en vez de cuantizar la gravedad, en realidad deberíamos hacer clásica la teoría cuántica para que pueda describir la gravedad.» De acuerdo con esta idea, habría que modificar la mecánica cuántica para hacerla compatible con la relatividad general, en vez de tratar de encajar la gravedad en la teoría cuántica tal y como la conocemos.

DEL PENSAMIENTO A LA REALIDAD

Cuando Feynman propuso su idea no existían la tecnología ni los conocimientos necesarios para resolver el problema. Incluso hoy en día, las dificultades continúan siendo abrumadoras. En el laboratorio de Aspelmeyer llevan varios años esforzándose por medir el campo gravitatorio de masas cada vez menores. Se trata de una empresa compleja: la enorme gravedad de la Tierra enmascara el campo gravitatorio de los objetos, incluso los de aquellos que son relativamente grandes. Hasta la fecha, la masa más pequeña para la que se ha medido el campo gravitatorio es una esfera de tungsteno de 700 miligramos. Eso viene a ser la masa de un clip o de una uva pasa, objetos descomunales en comparación con las partículas cuánticas.

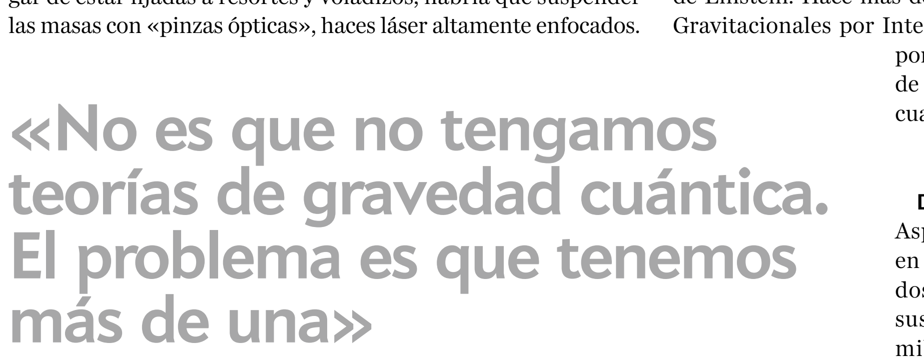
Para llevar a cabo el experimento mental de Feynman, Aspelmeyer y sus colaboradores tendrán que trabajar con objetos considerablemente menores que un clip. En estos momentos se encuentran desarrollando un prototipo experimental para detectar los campos gravitatorios de esferas de oro (material que eligieron por su densidad y pureza) de tamaño milimétrico, cuya masa apenas alcanza las decenas de miligramos. «Son entre decenas y centenas de veces más ligeros que cualquier otro objeto [cuyo campo gravitatorio] se haya medido hasta la fecha», asegura el físico. En el experimento, los investigadores si-

tuarán dos esferas de oro a unos pocos milímetros de distancia, con una de ellas unida a un pequeño imán montado en un muelle y la otra fija al extremo de un voladizo micromecánico. Al activar el electroimán, la esfera unida al muelle comenzará a vibrar, con lo que generará un campo gravitatorio variable que, a su vez, hará que la masa unida al voladizo se mueva de un lado a otro. El movimiento del voladizo, observado mediante láseres, básicamente amplificará la fuerza gravitatoria de la esfera unida al resorte, lo que facilitaría su detección frente al campo de fondo de la Tierra.



Tras perfeccionar la técnica para medir fuerzas gravitatorias débiles con masas ordinarias, los investigadores intentarían estudiar los efectos de la superposición cuántica. Si pudieran llevar una de las esferas a un estado de superposición, podrían estudiar cómo interacciona su campo gravitatorio con la otra. Si las partículas se entrelazan, el resultado confirmaría la intuición de Feynman sobre la naturaleza cuántica de la gravedad.

¿Qué hace falta para conseguir todo lo anterior? Para lograr una superposición cuántica, Aspelmeyer deberá reducir más de mil veces el tamaño de sus masas de prueba: de milímetros a fracciones de micrómetro. Al mismo tiempo, necesitará superposiciones de objetos lo suficientemente masivos como para generar campos gravitatorios detectables. Para ello, probablemente recurra al talento de un colega de Viena, Markus Arndt, quien ostenta el récord del mayor objeto que se haya llevado nunca a un estado de superposición: una molécula de más de 800 átomos. Y, en lugar de estar fijadas a resortes y voladizos, habría que suspender las masas con «pinzas ópticas», haces láser altamente enfocados.



«No es que no tengamos teorías de gravedad cuántica. El problema es que tenemos más de una»

—Carlo Rovelli, físico teórico de la Universidad de Aix-Marsella

«Si logramos detectar el campo gravitatorio de un objeto que podemos controlar a nivel cuántico, vamos bien encaminados», asegura Aspelmeyer. «Ese sería nuestro sueño a largo plazo; no para mañana ni para dentro de cinco años. Hemos de ir tanto “de arriba abajo” como “de abajo arriba” —hacer las masas [gravitatorias] más pequeñas y las masas [en superposición] más grandes—; creemos que sabemos cómo conseguirlo y cómo juntar ambos dominios. Ahora solo tenemos que trabajar duro.»

Arndt, el probable colaborador de Aspelmeyer, admite que el experimento presenta multitud de retos. Las diminutas masas esféricas serán propensas a interaccionar con cualquier superficie cercana, y resultará difícil aislarlas desde el punto de vista gravitatorio. «Hay múltiples efectos difíciles de suprimir», reconoce. «Pero hay que intentarlo, es indudable. Si no comenzamos ahora, en diez años no lo habremos hecho.» Arndt compara el esfuerzo que requerirá esta tarea con la búsqueda de ondas gravitacionales, un fenómeno predicho por la teoría de la relatividad general de Einstein. Hace más de tres años, el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO) las detectó por fin, pero el descubrimiento no llegó de un día para otro. «Fue un esfuerzo de cuarenta años», destaca Arndt.

EL ÚLTIMO REFUGIO DE LOS DISIDENTES CUÁNTICOS

Aspelmeyer no es el único que trabaja en este problema. En diciembre de 2017, dos grupos independientes publicaron sus propias versiones —ambas muy similares— del experimento mental de Feynman. El físico del Colegio Universitario de Londres Sougato Bose y sus colaboradores, por un lado, y Marletto y el investigador de Oxford Vlatko Vedral, por otro, propusieron un método para poner a prueba el entrelazamiento mediado por la gravedad sin tener que medir el campo gravitatorio de las partículas implicadas.

Su idea consiste en dejar caer en el vacío (en el campo gravitatorio de la Tierra) y durante un par de segundos dos esferas de diamante de micras de diámetro, cada una de ellas en un estado de superposición. Si las esferas estuvieran lo suficientemente cerca (a unas 100 micras de distancia, según los cálculos de Bose) deberían entrelazarse debido a la interacción de sus campos gravitatorios. Cuando eso sucede, las propiedades de las partículas entrelazadas muestran correlaciones que la física clásica no es capaz de explicar. Por ejemplo, el espín de una partícula (si apunta hacia arriba o hacia abajo)



ESTAS CÁMARAS DE VACÍO permiten aislar masas pequeñas de las influencias externas, un paso necesario para medir el campo gravitatorio que generan.

quedará determinado tan pronto como midamos el espín de su compañera.

Al estudiar la frecuencia con que se producen tales correlaciones (Bose indica que 10.000 intentos deberían bastar para obtener una respuesta), los investigadores podrían determinar si los diamantes en caída libre realmente se entrelazan. Una vez más, el entrelazamiento indicaría que la propia gravedad debe tener propiedades cuánticas. «Nuestro trabajo demostrará que la gravedad es cuántica, en el sentido de que cumple el principio de superposición», asegura Bose. El experimento comparte muchos retos con el de Aspelmeyer: la necesidad de llevar grandes objetos a estados de superposición que duren unos segundos y mantenerlos lo bastante juntos para que la gravedad pueda entrelazarlos. «Eso hace todo muy difícil», reconoce Bose, «pero estoy seguro de que lo veré en algún momento de mi vida».

Si dan resultado, ambos experimentos proporcionarán la primera prueba indirecta de que la gravedad —y por lo tanto el propio espaciotiempo— debe ser cuántica. Y esa perspectiva emociona a Rovelli y a otros expertos que han dedicado años a estudiar teorías de gravedad cuántica sin datos experimentales. «Creo que esta idea, el intento de observar la gravedad cuántica en el laboratorio, cambiaría las reglas del juego», apunta Rovelli. «Por lo que sabemos, está claro que [la naturaleza cuántica de la gravedad] debería ser real; si no es así, no hemos aprendido nada sobre el mundo.»

Un siglo después de su nacimiento, la mecánica cuántica sigue siendo la teoría científica más desconcertante. Algunos físicos, Einstein entre ellos, dudaron de que pudiera ser la última palabra sobre la naturaleza de la realidad. Sin embargo, innumerables experimentos han confirmado sus predicciones, por lo general con una precisión de múltiples cifras decimales. En cierto sentido, la cuestión de si la gravedad es cuántica o clásica representa el último refugio para aquellos que creen que debe haber algo incorrecto en la teoría cuántica. Si estos experimentos tienen éxito, ese refugio se vendría abajo.

«La teoría cuántica nos enseña una manera totalmente distinta de describir lo que podemos decir sobre la naturaleza», concluye Aspelmeyer. «El conjunto de reglas que hemos hallado por medio de la teoría cuántica tiene carácter fundamental y debe ser válido, en general, para todas nuestras teorías.»

PARA SABER MÁS

A micromechanical proof-of-principle experiment for measuring the gravitational force of milligram masses. Jonas Schmöle, Mathias Dragosits, Hans Hepach y Markus Aspelmeyer en *Classical and Quantum Gravity*, vol. 33, n.º 12, art. 125031, junio de 2016.

Gravitationally induced entanglement between two massive particles is sufficient evidence of quantum effects in gravity. Chiara Marletto y Vlatko Vedral en *Physical Review Letters*, vol. 119, n.º 24, art. 240402, diciembre de 2017.

Spin entanglement witness for quantum gravity. Sougato Bose et al. en *Physical Review Letters*, vol. 119, n.º 24, art. 240401, diciembre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

La gravedad cuántica, camino de convertirse en ciencia. Sabine Hossenfelder en *IyC*, enero de 2017.

Enredados en el espaciotiempo. Clara Moskowitz en *IyC*, marzo de 2017.

Cruzar la frontera cuántica. Tim Folger en *IyC*, septiembre de 2018.

FÍSICA TEÓRICA

RESCATAR LA GRAVEDAD

Puede que una teoría cuántica de la gravedad no requiera ideas radicales sobre la estructura microscópica del espacio y el tiempo. Una prometedora alternativa, la gravedad asintóticamente segura, aboga por reexaminar las ideas tradicionales desde una nueva perspectiva

Astrid Eichhorn y Christof Wetterich

EN SÍNTESIS

Uno de los grandes retos de la física teórica es entender el encaje de la gravedad y la física cuántica. Al considerar distancias más y más pequeñas, los cálculos tradicionales arrojan cantidades infinitas que no se cancelan. Ello anula la capacidad predictiva de la teoría.

Debido a esas dificultades, otros formalismos propuestos a lo largo de los años para cuantizar la gravedad, como la teoría de cuerdas o la gravedad cuántica de bucles, han planteado hipótesis completamente nuevas sobre la estructura microscópica del universo.

Los últimos años han visto resurgir un programa alternativo conocido como «gravedad asintóticamente segura». Según este, no sería necesario hacer ningún postulado radical sobre el mundo microscópico; bastarían las herramientas habituales de la teoría cuántica de campos.

Dicho enfoque propone que, a pequeñas distancias, el espaciotiempo sería como un fractal: sus propiedades no cambiarían por más que examinásemos escalas cada vez menores. Ello evitaría la aparición de cantidades infinitas en los cálculos y haría que la teoría fuese predictiva.



RESOLVER LAS SINGULARIDADES: La teoría de la relatividad general predice la existencia de puntos en los que la curvatura del espaciotiempo se torna infinita. Hace tiempo que los físicos creen que incorporar los efectos cuánticos de la gravedad debería solucionar esta anomalía.

G

Astrid Eichhorn investiga en el Instituto de Física Teórica de la Universidad de Heidelberg y es profesora en el Centro de Cosmología y Fenomenología de Física de Partículas (CP3-Origins) de la ciudad danesa de Odense. Sus trabajos se centran en la estructura microscópica del espaciotiempo.

Christof Wetterich es catedrático del Instituto de Física Teórica de la Universidad de Heidelberg. Es conocido por sus investigaciones en gravedad cuántica y cosmología.

GRAN PARTE DE LA FASCINACIÓN QUE EJERCEN los agujeros negros proviene de preguntarse qué esconden en su interior. Hasta ahora los astrónomos han obtenido indicios de su existencia en distintos lugares del universo. Por lo que sabemos, algunos se forman tras la explosión de estrellas decenas de veces más masivas que el Sol; otros, muchísimo mayores, ocupan el centro de las galaxias. Estos enigmáticos objetos son además fuentes de ondas gravitacionales, lo que desde 2015 ha permitido investigarlos de una manera completamente nueva.

La teoría de la relatividad general de Einstein describe los agujeros negros con gran precisión. Según ella, estos objetos presentan tal concentración de masa que curvan el espaciotiempo hasta el extremo de no permitir que ni siquiera la luz pueda escapar de ellos. Pero, al mismo tiempo, los agujeros negros señalan uno de los puntos débiles de la relatividad general. Los cálculos revelan que, en su centro, la curvatura del espaciotiempo se torna infinita: una característica que los matemáticos denominan «singularidad». Hace décadas que los científicos buscan una explicación para este resultado. En física, una situación así revela que la teoría empleada no es completa. Obtener un resultado infinito como respuesta a una pregunta física nos indica que la teoría que estamos usando ha dejado de ser aplicable.

La teoría general de la relatividad efectúa predicciones detalladas en casi cualquier situación del universo conocido. Sin embargo, pierde su validez en el interior de los agujeros negros. Para describir esa región necesitaríamos disponer de un conocimiento más profundo del espaciotiempo. ¿Qué aspecto está obviando la relatividad general al describir la región próxima a una singularidad?

LA FÍSICA DEL VACÍO CUÁNTICO

La respuesta podría hallarse en la física cuántica. En las otras tres interacciones fundamentales de la naturaleza los efectos cuánticos desempeñan un papel clave. Sin embargo, no ocurre así en relatividad general. Esta proporciona una descripción clásica y determinista de la naturaleza, en la que las cantidades medibles toman siempre valores bien definidos. La teoría cuántica, en cambio, solo predice las probabilidades de los posibles resultados de una medición. Por ejemplo, la posición de un objeto cuántico no es siempre la misma, sino que fluctúa en torno a un valor medio. Pero la relatividad general, al ser una teoría clásica, no deja lugar a las probabilidades.

Las teorías de campos describen todas las fuerzas fundamentales de la naturaleza. Como su nombre indica, en ellas las cantidades centrales son campos: magnitudes que toman un valor en cada instante del tiempo y en cada punto del espacio. Para visualizarlo, podemos imaginar un paisaje montañoso, en el que la altitud en cada punto representaría el valor del campo. En una teoría clásica, la altitud puede determinarse con tanta precisión como deseemos. Así ocurre en relatividad general, en la que el campo en cuestión es la métrica, la función que permite calcular la distancia entre dos puntos cercanos.

En una teoría cuántica de campos, estos no toman valores bien definidos, sino que fluctúan en torno a un valor medio. Un ejemplo visual nos lo proporciona la elevación de la superficie del mar. Medida desde un satélite, el resultado será un promedio espacial y temporal debido a la resolución limitada de los instrumentos. Las olas, por su parte, representan fluctuaciones en torno a dicho promedio. También podremos estimar la altura media de las olas, aunque no sabremos cómo calcular el valor preciso en un punto e instante dados. Algo parecido ocurre con los campos cuánticos. No obstante, la diferencia básica es que, en este caso, tales limitaciones no se deben a las deficiencias de nuestros instrumentos, sino a una incertidumbre intrínseca de la naturaleza.

Lo anterior tiene importantes consecuencias para el mismo vacío. Lejos de ser «la nada», el vacío cuántico se asemeja a un medio repleto de las fluctuaciones de todos los campos. El efecto de tales fluctuaciones puede calcularse, aunque el cómputo no es fácil y, de hecho, constituye uno de los principales problemas a los que se enfrenta la búsqueda de una teoría cuántica de la gravedad.

Pero la importancia de las fluctuaciones cuánticas va más allá. La intensidad con que interaccionan los distintos campos viene dada por ciertos parámetros conocidos como «constantes de acoplamiento». Las fluctuaciones del vacío provocan que estas cantidades, a pesar de su nombre, varíen. Su valor depende de la escala de distancias con la que decidamos estudiar un fenómeno o, de manera equivalente, de la energía empleada en nuestro experimento.

Para explorar el mundo subatómico, los físicos utilizan aceleradores de partículas. Aumentar su energía equivale a incremen-

tar la resolución con que se examinan los distintos fenómenos, lo que permite investigar los constituyentes elementales de la materia a distancias cada vez menores. Sin embargo, al hacerlo nos encontramos con un fenómeno intrigante: las constantes de acoplamiento no permanecen fijas, sino que cambian. Ello se debe a que las fluctuaciones cuánticas pueden apantallar o amplificar la intensidad con la que los distintos campos fundamentales interaccionan entre sí.

La interacción nuclear fuerte actúa entre aquellas partículas dotadas de «carga de color» (una generalización de la carga eléctrica, sin relación con los colores de la luz). Este es el caso de los quarks que constituyen los protones y los neutrones. Las partículas que transmiten esta interacción reciben el nombre de gluones, término derivado del inglés *glue* («pegamento»). Tanto el campo asociado a los gluones como el correspondiente a los quarks fluctúa. Cuando analizamos procesos a bajas energías, o a grandes distancias, la constante de acoplamiento de la interacción fuerte aumenta, lo que implica que los quarks se ligan unos a otros con mayor intensidad. Sin embargo, a energías elevadas dicha constante se acerca a cero. En otras palabras: cuando aumentamos la resolución y analizamos qué les ocurre a los quarks a distancias cada vez menores, observamos que estos se comportan como si fueran partículas casi libres, que apenas interaccionan entre sí. Esta propiedad de la interacción fuerte recibe el nombre de «libertad asintótica».

Con la contante de acoplamiento de la interacción electromagnética, también llamada constante de estructura fina, ocurre lo contrario. A energías bajas, toma un valor cercano a 1/137. Sin embargo, a las energías a las que opera el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, su valor asciende hasta 1/128. Este aumento puede visualizarse con facilidad en términos de las fluctuaciones del vacío cuántico. Estas producen constantemente pares de partículas y antipartículas virtuales que se aniquilan justo después de formarse. Al medir la intensidad del campo producido por una carga eléctrica puntual, estos pares virtuales rodean dicha carga y la apantallan, tanto más cuanto más nos alejamos de ella. En cambio, si nos acercamos a la fuente, encontraremos menos pares virtuales alrededor de la carga, por lo que la intensidad de la interacción aumentará.

A escalas extremadamente pequeñas, mucho menores que la llamada longitud de Planck (equivalente a unos 10^{-35} metros), el valor de la constante de estructura fina crece sin límite. Desde el punto de vista de la descripción teórica actual, este valor infinito constituye una señal de que nuestro modelo es incompleto; un problema que podría solucionarse al incorporar los efectos de la gravedad cuántica. Vemos, pues, que las constantes de acoplamiento —y, con ellas, la intensidad de las diferentes interacciones— no son constantes, sino que su valor depende de la energía a la que las midamos.

UNA LONGITUD FUNDAMENTAL

El significado de la escala de Planck

Al comparar las cantidades fundamentales que aparecen en relatividad general con aquellas que surgen en la teoría cuántica, nos encontramos con una escala de distancias clave: una en la que tanto los efectos cuánticos como los de la gravedad se tornan importantes. Dicha escala es la longitud de Planck, l_p.

Esta escala de distancias viene dada por cierta combinación de tres constantes fundamentales de la naturaleza: la constante de la gravitación universal, *G*; la velocidad de la luz, *c*, y la constante de Planck, *h*. En concreto:

$$l_p = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^3}} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-35} \text{ metros},$$

unas 10^{20} veces menor que el tamaño de un protón. Se trata de una distancia inimaginablemente minúscula. Para hacernos una idea, la longitud de Planck es al punto final de esta frase lo que este es al tamaño del universo observable.

En física, a toda longitud puede asociarse una escala de energía. En este caso, la energía correspondiente a la escala de Planck asciende a unos 10^{16} teraelectronvoltios (TeV), 15 órdenes de magnitud por encima de los 13 TeV a los que opera el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN.

La escala de Planck no desempeña ningún papel en la vida cotidiana. Sin embargo, representa la distancia a la que la gravedad ya no puede describirse en términos clásicos, razón por la que aparece en los cálculos de gravedad cuántica y reviste gran importancia para entender las leyes fundamentales de la naturaleza. Estudiar el comportamiento que predicen distintos modelos en dicho régimen de distancias permite comparar propuestas rivales.

UN MICROSCOPIO PARA EL ESPACIOTIEMPO

El resultado anterior nos lleva de vuelta al centro de los agujeros negros. ¿Comienza la constante de la gravitación universal a variar cuando exploramos el espaciotiempo a distancias cada vez menores? ¿Qué efecto ejercen las fluctuaciones cuánticas sobre la gravedad? En este sentido, la gravedad se comporta de forma análoga al resto de las interacciones fundamentales, con una intensidad de la interacción dependiente de la resolución con la que miremos. Investigar esto en detalle, sin embargo, no resulta tan sencillo.

Una primera dificultad radica en el hecho de que, a diferencia de la constante de estructura fina, la constante de la gravitación universal no es un número puro, sino que tiene unidades físicas. Esto implica que su valor depende del sistema de unidades que usemos. La ventaja de las cantidades puras, o «adimensionales», reside en que nos permiten comparar la influencia de las diferentes fuerzas: cuanto mayor sea una constante, más intensa será la interacción correspondiente. En el caso de la gravedad, para poder trabajar con un número adimensional, los físicos definen una nueva constante de la gravitación, $g(l)$. Esta nos proporciona una relación entre la minúscula longitud de Planck y la escala de longitud l a la que efectuamos nuestra medida, que en esencia se corresponde con la longitud de onda asociada a las partículas usadas en la observación.

La diferencia básica entre la gravedad y las demás fuerzas fundamentales se debe a que la constante de acoplamiento gravitatoria depende de la resolución incluso antes de introducir las fluctuaciones cuánticas. A escalas de longitud macroscópicas, e incluso a escalas subatómicas, la intensidad de la gravedad es extremadamente pequeña. La razón por la que esta fuerza resulta tan importante para nosotros se debe a que los objetos que nos rodean se hallan compuestos por una ingente cantidad de átomos. Sin embargo, entre partículas elementales, el efecto de la gravedad es insignificante comparado con el de las demás interacciones. Solo a resoluciones mucho mayores que

las alcanzadas en los aceleradores de partículas, y muy por debajo de la longitud de Planck, la constante de la gravitación se aproxima con rapidez a infinito. En este régimen, la descripción clásica deja de funcionar y cabe esperar que los efectos de la gravedad cuántica se tornen importantes.

En las últimas décadas, los físicos teóricos han desarrollado numerosas ideas acerca de cómo podría comportarse el espaciotiempo a dichas escalas y de qué manera podrían evitarse los infinitos en la constante de acoplamiento gravitatoria. Una característica común de estos análisis es que van más allá del paradigma de la teoría cuántica de campos, que tan bien ha funcionado para las otras tres interacciones fundamentales.

Sin embargo, existe una prometedora alternativa en la que no es necesario hacer ninguna hipótesis rompedora acerca de la estructura microscópica del espaciotiempo: el enfoque conocido como «seguridad asintótica». En este, los infinitos desaparecen debido a las mismas fluctuaciones cuánticas mencionadas antes. Estas provocarían que, a distancias muy pequeñas, la constante de acoplamiento gravitatoria $g(l)$ se aproximase asintóticamente a cierto valor finito, g^*. De ocurrir así, ello nos permitiría entender la gravedad cuántica a un nivel fundamental y calcular sus efectos, con lo que la singularidad del centro de los agujeros negros desaparecería. El camino que condujo a estas ideas ha sido largo, ya que para eliminar los infinitos de forma correcta han de emplearse técnicas matemáticas muy complejas que, en algunos casos, solo se han desarrollado hace poco.

En la jerga de los físicos teóricos, el valor g^* recibe el nombre de «punto fijo ultravioleta». Aquí el término *ultravioleta* no hace referencia a una longitud de onda determinada de la luz, sino a energías muy elevadas. Por su parte, *punto fijo* denota un valor que no cambia cuando variamos la resolución, lo que indica que la física resulta independiente de la escala. Imaginemos que pudiésemos observar la interacción gravitatoria entre partículas elementales con un microscopio muy potente. Al ampliar progresivamente la imagen, veríamos cómo la intensidad de la interacción cambia. No obstante, llegaría un momento en el que, por más que aumentásemos la resolución, ya no observaríamos modificación alguna. Llegados ahí habríamos alcanzado el punto fijo.

INTENSIDAD DE LAS INTERACCIONES

Constantes de acoplamiento

En la naturaleza existen cuatro interacciones fundamentales. Aunque en nuestro día a día solo experimentamos directamente dos de ellas, la gravedad y el electromagnetismo, en el mundo atómico y el de las partículas elementales intervienen también las interacciones nucleares fuerte y débil. En una situación física determinada, ¿qué interacción domina y en qué medida lo hace? Dependiendo del sistema físico que consideremos, algunas cantidades «dimensionales» (es decir, con unidades físicas), como la masa, desempeñan un papel. Sin embargo, para comparar las intensidades relativas de las interacciones necesitamos emplear números puros; es decir, sin dimensiones. Estas cantidades vienen dadas por las llamadas «constantes de acoplamiento».

Estos parámetros pueden medirse en los experimentos de física de partículas y, a pesar de su nombre, no permanecen constantes, sino que dependen de la energía del proceso que estemos considerando. A energías del orden de 100 gigaelectronvoltios (unas 100 veces menores que las que alcanza el LHC), la mayor constante de acoplamiento es la asociada a la interacción fuerte, la fuerza que mantiene unidos a protones y neutrones en el núcleo atómico. Las intensidades de las interacciones electromagnética y débil son algo más pequeñas. La constante de acoplamiento gravitatoria, sin embargo, es 34 órdenes de magnitud menor.

RESCATE EN EL INFINITO

Una manera de entender que la constante de acoplamiento gravitatoria pueda cambiar con la escala consiste en pensar que, toda vez que incorporamos las fluctuaciones cuánticas, la longitud de Planck deja de ser constante: su valor dependería de la resolución con la que observáramos. Aunque esto tal vez pueda sonar extraño, semejante comportamiento no es poco habitual. Si medimos la longitud de una costa usando un mapa muy pequeño, estaremos obviando pequeñas calas y salientes que no aparecen reflejados en él. Pero si, en su lugar, empleamos un mapa mayor y más detallado, veremos estructuras menores. Como resultado, la longitud de la costa depende de la resolución con que la examinemos.

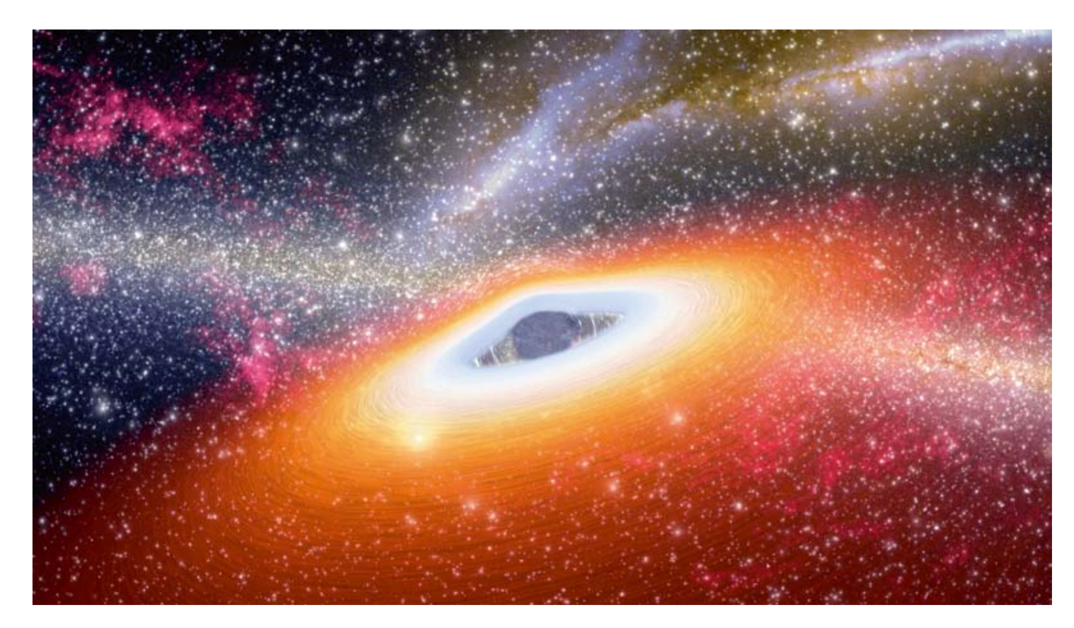
De forma similar, en gravedad cuántica la longitud de Planck se reemplaza por una longitud de Planck efectiva. Esta depende de la longitud característica de observación, l, determinada por la longitud de onda de las partículas que usamos o, de manera equivalente, por su energía. Las fluctuaciones cuánticas podrían hacer que la longitud de Planck tomase valores muy pequeños. De esta forma, la constante de acoplamiento gravitatoria, determinada a partir de la relación entre l y la longitud de Planck efectiva, se acercaría al valor g^* a cortas distancias.

Cuando medimos a escalas mayores que la longitud de Planck clásica, las fluctuaciones cuánticas resultan insignificantes y la longitud de Planck permanece constante. En tal caso, la interacción gravitatoria entre partículas es extremadamente débil En la situación contraria, a energías elevadas, considerar que la longitud de Planck efectiva es constante ya no proporciona una buena aproximación. Dicha longitud tiende a cero a medida que exploramos distancias menores, de manera proporcional a la escala de la resolución. Como consecuencia, el acoplamiento gravitatorio no aumenta, sino que se mantiene en un valor fijo. Dado que la física sigue siendo la misma cuando aumentamos la escala de resolución, este fenómeno recibe el nombre de invariancia de escala.

Todo lo anterior se aplica a los agujeros negros. La conclusión de que en su centro el espaciotiempo presenta una curvatura infinita procede de la teoría clásica, en la que las fluctuaciones cuánticas no desempeñan ningún papel. En ella, el acoplamiento gravitatorio crece sin límite a medida que aumentamos la resolución de nuestras medidas. Pero, en el contexto de la seguridad asintótica, las propias fluctuaciones cuánticas limitan dicho crecimiento. Es así como la gravedad cuántica se protege de las temidas singularidades de la teoría clásica. El modelo debe su nombre a esta «seguridad» frente a los infinitos que emergen a altas energías.

La idea de la seguridad asintótica ya se ha aplicado al estudio de los agujeros negros y el enfoque se muestra muy prometedor, aunque matemáticamente muy exigente. Numerosos cálculos solo han sido posibles gracias al desarrollo de nuevos métodos. Esta y otras razones explican que, a pesar de que sus orígenes

INTERIOR ENIGMÁTICO: En el interior de un agujero negro (*recreación artística*), las ecuaciones de Einstein pierden su capacidad predictiva. Una teoría viable de la gravedad cuántica debería proporcionar una descripción coherente de estos misteriosos objetos.



NASA/JPL/CALTECH

se remonten a varias décadas atrás, la gravedad cuántica asintóticamente segura solo se haya convertido en un campo de investigación reconocido hace relativamente poco.

RENORMALIZACIÓN

La herramienta matemática básica de lo que hemos explicado hasta ahora es el llamado grupo de renormalización. Tras este nombre se esconde una versión matemática de ese «microscopio» que permite a los físicos explorar la dinámica de un sistema a diferentes escalas. Usarlo nos permite examinar, en el sistema completo, qué efectos resultan importantes en cada escala. El grupo de renormalización hace posible identificar qué términos contribuyen y siguen siendo importantes cuando pasamos de una escala a la siguiente. Los términos restantes se incorporan al cálculo a través de sus valores medios o en forma de pequeñas correcciones. Para entenderlo, podemos pensar en el agua o en el aire fluyendo. Para describir estos sistemas no es necesario conocer cómo se mueve cada una de las moléculas que los constituyen. Basta con considerar la temperatura y la densidad medias de conjuntos lo suficientemente grandes de moléculas y tener en cuenta las interacciones entre ellos.

La mejor manera de calcular con el grupo de renormalización consiste en emplear una estrategia que ha funcionado muy bien con las demás interacciones fundamentales: la teoría de perturbaciones. Esta se basa en la hipótesis de que las interacciones entre partículas son débiles incluso cuando consideramos energías elevadas. Una aplicación exitosa de este procedimiento conduce a que haya un número limitado de parámetros independientes en términos de los cuales resulta posible describir el sistema. Tales cantidades son manejables matemáticamente y pueden medirse en el experimento. Gracias a este formalismo, podemos extender una teoría clásica de campos, como la electrodinámica, al dominio de la física cuántica.

Aunque con frecuencia resulte complicada, la técnica del grupo de renormalización ha demostrado ampliamente su efectividad y ha sido responsable de la concesión de varios premios Nobel. Cuando los físicos teóricos intentaron aplicar esta estrategia a la gravedad, hallaron que, en cada paso del grupo de renormalización, era necesario considerar numerosas contribuciones. Como consecuencia, resultaba imposible eliminar los infinitos. Esto se conoce como «no renormalizabilidad perturbativa de la gravedad cuántica», y constituye la razón por la que se han buscado otros procedimientos para cuantizar la gravedad.

Como consecuencia, en los últimos decenios se han propuesto múltiples ideas para describir la gravedad desde un punto de vista cuántico. Tales escenarios se alejan del formalismo bien explorado de la teoría cuántica de campos. Los ejemplos más conocidos son la teoría de cuerdas y la gravedad cuántica de bucles. En este sentido, la gravedad cuántica asintóticamente segura puede considerarse una estrategia conservadora, ya que se mantiene dentro del marco conceptual de la teoría cuántica de campos. Lo que hace es desplazar el foco de la teoría de perturbaciones y centrarse en los puntos fijos, donde la intensidad de la interacción permanece finita. Debido a la invariancia de escala que emerge en esos puntos, los infinitos desaparecen incluso cuando exploramos las escalas más diminutas.

Pero, al mismo tiempo, la gravedad cuántica asintóticamente segura es también una propuesta relativamente audaz. Mantiene que, en principio, los constituyentes fundamentales del universo son los que ya conocemos, y que los problemas que tradicionalmente ha presentado el reto de cuantizar la gravedad se deben a que hemos estado analizando sus interacciones desde la perspectiva equivocada.

FRACTALES EN EL ESPACIOTIEMPO

Una de las cuestiones centrales en este campo de investigación es cómo obtener un punto fijo cuando la constante de acoplamiento depende de la escala. El físico estadounidense Steven Weinberg, galardonado en 1979 con el premio Nobel por su contribución a la unificación de las interacciones electromagnética y nuclear débil, ya planteó en los años setenta la posibilidad de que la gravedad cuántica fuera una teoría asintóticamente segura. Sin embargo, el gran avance llegó en 1998 gracias al trabajo de Martin Reuter, de la Universidad de Maguncia. Reuter aplicó el método de la «renormalización funcional», desarrollado algo antes por uno de los autores de este artículo (Wetterich). Eso le permitió, como si de un microscopio matemático se tratara, penetrar en todas las posibles estructuras de interacción de la gravedad y buscar así la invariancia de escala. Los físicos teóricos continúan sondeando la complicada dinámica de las fluctuacio-

«CONSTANTES» VARIABLES

Efectos del vacío cuántico

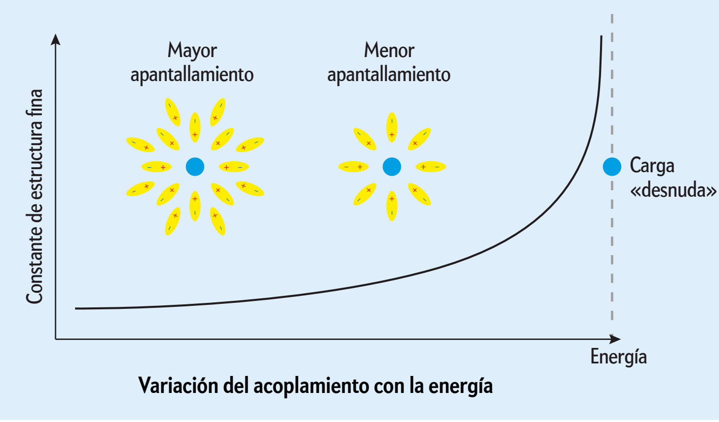
La llamada constante de estructura fina describe la intensidad de la interacción electromagnética. Pero, a pesar de su nombre, esta cantidad no es constante, sino que su valor depende de la resolución de nuestro experimento. En concreto, aumenta a medida que consideremos distancias cada vez menores (o, de manera equivalente, energías mayores, *gráfica*). Dicho efecto puede entenderse como una consecuencia de la estructura del vacío en física cuántica.

Pares virtuales partícula-antipartícula

Electrón

Apantallamiento de la carga eléctrica

El vacío cuántico puede verse como un medio lleno de partículas y antipartículas «virtuales» que se crean y aniquilan sin cesar. Si consideramos un electrón, las cargas virtuales positivas del vacío tenderán a rodearlo y, de esta manera, apantallarán parcialmente su carga negativa (*esquema*). A medida que nos acerquemos a la partícula, el número de cargas virtuales que lo rodean disminuirá, por lo que el apantallamiento será menor y el valor efectivo de la carga aumentará.



Variación del acoplamiento con la energía

MIKE BECKERS, SEGÚN ASTRID EICHHORN/*SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*

nes cuánticas del espaciotiempo, y varios indicios sugieren que, en efecto, parece haber un punto fijo.

En todo caso, nuestro universo no solo se compone de espacio y tiempo, sino que contiene también partículas elementales. La combinación de las fluctuaciones cuánticas de las partículas con las de la gravitación complica el análisis. Pero también en la descripción conjunta de ambos elementos han aparecido hace poco indicios de invariancia de escala.

La estructura espaciotemporal resultante puede describirse matemáticamente usando fractales. Estos objetos se caracterizan por presentar el mismo aspecto con independencia de la resolución con que los examinemos. Podemos encontrar formas fractales en la vida cotidiana: si miramos con atención un tallo de brócoli, comprobaremos que su estructura se asemeja a la del vegetal entero. De forma similar, en la gravedad cuántica asintóticamente segura, la evolución de la longitud de Planck efectiva puede interpretarse como una estructura fractal del espaciotiempo. A partir de cierto momento no observaremos grandes cambios por más que examinemos escalas más y más pequeñas.

Para decidir cuál de los candidatos a una teoría cuántica de la gravedad guarda alguna relación con la naturaleza, hemos de comparar los resultados de los distintos modelos con las observaciones experimentales. Sin embargo, los efectos de la gravedad cuántica solamente se hacen notar a energías extraordinariamente elevadas. Incluso la energía a la que opera el LHC es unas 10^{15} veces menor que la necesaria para estudiar la física a la escala de Planck.

Aun así, los experimentos en aceleradores podrían permitir comprobar algunas de las predicciones de la teoría de gravedad cuántica asintóticamente segura, ya que esta nos da información sobre la intensidad con que las partículas elementales interaccionan entre sí. Esto último guarda relación con la manera en que las escalas físicas más pequeñas afectan al mundo macroscópico en el que vivimos. La cuestión puede verse del modo siguiente: claramente, la física que observamos a nuestro alrededor no es la misma a todas las escalas. ¿Cómo se acomoda este hecho con una descripción microscópica en la que el universo sí es invariante de escala?

La autosemejanza exacta solo ocurre en el punto fijo, cuando la resolución l se aproxima a cero. Sin embargo, este límite matemático resulta imposible de alcanzar físicamente. A cualquier valor finito de l, el acoplamiento gravitatorio se hallará fuera del punto fijo, y la diferencia aumentará a medida que consideremos longitudes cada vez mayores. Eso quiere decir que, fuera del punto fijo, la simetría de escala se rompe. En el contexto de la gravedad asintóticamente segura, los fenómenos que observamos en el cosmos, en los aceleradores de partículas o en la vida cotidiana dependen de la manera precisa en que se comportan los acoplamientos cuando nos alejamos del punto fijo.

DE LA TEORÍA AL EXPERIMENTO

En física estadística, el concepto de punto fijo lleva estudiándose desde hace décadas. Gracias a ello sabemos que la manera en que un sistema se aleja del punto fijo tan solo depende de un pequeño número de parámetros, los denominados «parámetros relevantes». Sus valores no pueden calcularse a priori, sino que han de determinarse por medio del experimento. Todas las constantes de acoplamiento pueden expresarse en términos de dichos parámetros, mientras que cualquier otra información no contenida en ellos desaparecerá en el punto fijo. En términos matemáticos, esto puede describirse de forma precisa usando las herramientas del grupo de renormalización. Cuando pasamos de las escalas microscópicas a las macroscópicas, es posible estudiar el sistema a partir de un número finito de parámetros relevantes. Todo lo demás puede describirse en términos de ellos.

Lo anterior constituye la base teórica que, en un contexto termodinámico, nos permite predecir qué ocurre durante las llamadas transiciones de fase de segundo orden. Este tipo de cambios suceden, por ejemplo, en aquellos metales que a tem-

peratura ambiente se comportan como conductores normales pero que, al alcanzar una cierta temperatura crítica, se tornan superconductores. Los puntos fijos revisten una importancia fundamental en este tipo de sistemas.

Cerca de una transición de fase, el material «olvida» toda la información sobre sus propiedades físicas salvo aquella contenida en unos pocos parámetros relevantes. Como consecuencia, materiales muy distintos, desde imanes hasta fluidos, se comportan del mismo modo durante una transición de fase de segundo orden, con independencia de su estructura microscópica. Esta irrelevancia de la información sobre lo que ocurre a escalas pequeñas aparece también en teoría cuántica de campos. Es justamente dicho fenómeno el que, en electrodinámica cuántica, nos permite hacer predicciones muy precisas a partir de un único parámetro: la constante de estructura fina. De igual modo, en el modelo estándar de la física de partículas, todas las cantidades observables pueden expresarse en términos de unos pocos «parámetros renormalizables».

Lo anterior constituye la base de las predicciones de la gravedad cuántica en física de partículas. Primero, comparamos el número de parámetros relevantes en el punto fijo con el número de los acoplamientos renormalizables del modelo estándar. Si el número de parámetros relevantes fuera menor, los acoplamientos sobrantes serían lo que los físicos teóricos llaman «parámetros irrelevantes». Esto no quiere decir que carezcan de importancia, sino que pueden expresarse en términos de los parámetros relevantes del sistema. Por tanto, son en principio calculables.

Un ejemplo lo hallamos en la masa del bosón de Higgs. Una vez conocida la intensidad de la interacción débil, la masa de esta partícula puede expresarse en términos del autoacoplamiento del bosón de Higgs, el parámetro que mide la intensidad con que

SEGURIDAD ASINTÓTICA

El espaciotiempo a la escala de Planck

Cuando profundizamos en la estructura del espacio y el tiempo y alcanzamos la escala de Planck, los efectos cuánticos se hacen apreciables y generan fluctuaciones del propio espaciotiempo. Un enfoque teórico para analizarlas, conocido como gravedad asintóticamente segura, postula que, a partir de cierto momento, la estructura espaciotemporal subyacente permanecería inalterada por más que continuásemos examinando escalas cada vez menores. Este comportamiento recibe el nombre de invariancia de escala.

La intensidad de la gravedad puede expresarse a partir de una constante de acoplamiento efectiva, *g*, dada por la relación entre la longitud de Planck y la escala de distancias a la que estemos efectuando el experimento. En un abanico de distancias muy amplio, la gravedad se mantendrá débil. La constante de acoplamiento solo comenzaría a crecer cuando examinamos el espaciotiempo a escalas próximas a la longitud de Planck (o, de manera equivalente, a energías muy elevadas, *diagrama*). En el contexto de la relatividad general, dicho crecimiento es indefinido y la constante de acoplamiento se torna infinita, un síntoma de que la teoría ha dejado de ser válida.

Sin embargo, las fluctuaciones cuánticas podrían causar que la constante *g* se acercase asintóticamente a un valor fijo, *g**. De ocurrir así, los cálculos de gravedad cuántica a energías elevadas cobrarían sentido.

Dominio clásico
Dominio de Planck
Constante de acoplamiento efectiva (*g*)
Energía
Punto fijo (*g**)

Fractales e invariancia de escala

En matemáticas, un ejemplo de estructuras invariantes de escala lo hallamos en los fractales, objetos geométricos que presentan siempre el mismo aspecto con independencia de la escala a la que los examinemos. Por ejemplo, en el triángulo de Sierpinski (*figura*), cualquier sección constituye una réplica del fractal en su conjunto.

MIKE BECKERS, SEGÚN ASTRID EICHHORN/*SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*

estos bosones interaccionan entre sí. En el modelo estándar, este acoplamiento es renormalizable, por lo que su valor debe determinarse por medio del experimento. Sin embargo, en el punto fijo de la gravedad cuántica asintóticamente segura, el autoacoplamiento del bosón de Higgs se convierte en un parámetro irrelevante, por lo que su valor queda fijado. Esta argumentación sirvió de base a un trabajo publicado en 2010 por Mikhail Shaposhnikov, hoy en la Escuela Politécnica Federal de Lausana, y uno de los autores de este artículo (Wetterich) donde predijimos que la masa del bosón de Higgs rondaría los 126 gigaelectronvoltios (GeV). Cuando, dos años después, la partícula fue descubierta en el LHC, su masa resultó ser de 125 GeV.

Además del bosón de Higgs, hay otra partícula que podría brindarnos una forma de poner a prueba la teoría. Se trata del quark *cima* (*top*), la partícula elemental más masiva conocida. Su masa fue determinada experimentalmente en 1995 en el acelerador Tevatron de Fermilab, cerca de Chicago. Existen indicios de que la gravedad cuántica asintóticamente segura podría predecir su valor. De ser el caso, ello podría clarificar por qué la masa del quark *cima* es mucho mayor que la del quark *fondo* (*bottom*). Sin embargo, tales cálculos resultan demasiado complejos para poder llevarlos a cabo de forma exacta, por lo que nos vemos obligados a efectuar hipótesis que simplifiquen el problema. Con todo, esta estrategia permite derivar valores para las masas de los quarks *cima* y *fondo* que concuerdan con las medidas experimentales. En caso de que estos resultados se vieran confirmados por futuros estudios, ello abriría la puerta a comprobar por medios empíricos indirectos la teoría de gravedad asintóticamente segura.

Por último, también la cosmología podría ofrecer una ventana experimental a la gravedad cuántica. La expansión del universo funciona como una «lupa» sobre las estructuras que existieron en el universo primitivo. En concreto, el fondo cósmico de microondas codifica información sobre lo que ocurrió durante los primeros instantes tras la gran explosión. Las observaciones realizadas hasta ahora indican que el espectro de dicha radiación es muy aproximadamente invariante de escala, que es justamente lo que esperaríamos en el punto fijo de una

RENORMALIZACIÓN

Un microscopio matemático

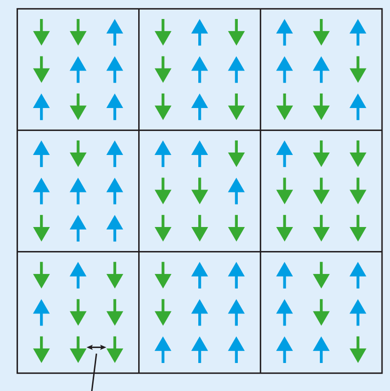
Si partimos de una descripción de la naturaleza basada en las interacciones entre partículas individuales, ¿cómo identificar regularidades a grandes escalas? ¿Qué cambia al pasar de una escala a otra? Para responder a esta pregunta, los físicos emplean una herramienta matemática conocida como grupo de renormalización.

Una manera visual de ilustrar la idea consiste en considerar un plano repleto de partículas dotadas de carga eléctrica y cuyo espín solo puede apuntar hacia arriba o hacia abajo (*figura*). La combinación de carga y espín hace que las partículas se comporten como pequeños imanes que pueden interaccionar entre sí. En tal caso, la intensidad de la interacción estará determinada por una constante de acoplamiento magnético, g_0, la cual determina la intensidad de la interacción entre dos partículas vecinas.

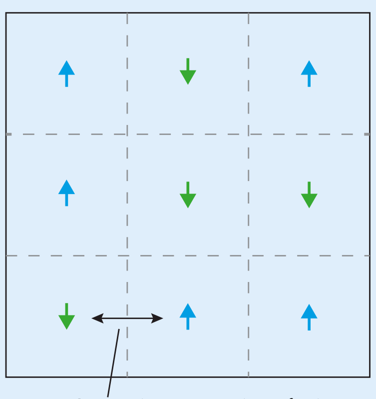
Para estudiar el sistema a escalas de longitud mayores, basta con dividir el plano en bloques que contengan varias partículas (nueve, en el ejemplo de la figura). A continuación, reemplazamos todas las partículas de cada bloque por un único «espín efectivo», cuya orientación puede determinarse, por ejemplo, usando la regla de la mayoría.

La interacción entre estos espines efectivos ya no estará gobernada por la constante original, g_0, sino por un nuevo acoplamiento, g_1. Este proceso puede repetirse para definir nuevos espines

Descripción del sistema a escala menor



Descripción del sistema a escala mayor



efectivos a partir de los anteriores, cuya constante de acoplamiento magnético vendrá dada por una nueva constante, g_2, y así sucesivamente. Ello nos permite obtener una descripción del sistema a escalas cada vez mayores. El conjunto de técnicas matemáticas asociadas a esta cadena de transformaciones, en las que la constante de acoplamiento va cambiando con la escala, $g_0 \rightarrow g_1 \rightarrow g_2 \rightarrow \ldots$, es lo que se conoce como grupo de renormalización.

De forma análoga, las constantes de acoplamiento de las interacciones fundamentales no mantienen el mismo valor a todas las escalas, sino que dependen de la resolución con la que observemos. Así, la constante de acoplamiento del electromagnetismo crece a medida que consideramos distancias menores, mientras que la de la interacción nuclear fuerte disminuye.

El grupo de renormalización permite aumentar y disminuir la resolución de nuestro microscopio matemático. Por supuesto, los sistemas reales revisten mayor complejidad que el modelo expuesto aquí, pues suelen incluir distintos constituyentes con múltiples estados posibles y numerosos parámetros. El éxito de esta estrategia de análisis depende, entre otras cosas, de qué detalles se incorporan o ignoran en cada paso. Decimos que una teoría es renormalizable cuando, en cada uno de dichos pasos, el número de parámetros necesarios para describir el sistema permanece finito.

MIKE BECKERS/*SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*



¿INDICIOS EXPERIMENTALES? La energía a la que operan los aceleradores de partículas (*en la imagen, un sector del túnel del LHC del CERN*) es muchos órdenes de magnitud inferior a la escala de Planck. Sin embargo, algunos modelos de gravedad cuántica parecen implicar efectos medibles a bajas energías. En 2010, un cálculo basado en el formalismo de la gravedad asintóticamente segura predijo correctamente el valor de la masa del bosón de Higgs, descubierto dos años después.

teoría de gravedad asintóticamente segura. Y, al mismo tiempo, la seguridad asintótica podría ser la estrategia adecuada para resolver no solo la singularidad del centro de los agujeros negros, sino también la asociada a la gran explosión que dio origen a nuestro universo.

RETOS FUTUROS

Por ahora, las mayores dificultades a las que se enfrenta este programa de investigación radican en las simplificaciones que nos vemos obligados a efectuar para abordar algunos cálculos. Varios grupos, la mayoría de ellos en Europa, trabajamos en la tarea de minimizar los errores sistemáticos derivados de estas aproximaciones. Intentamos determinar si los cálculos apoyan o no la existencia de un punto fijo y si los términos que hemos obviado pueden realmente despreciarse.

Al mismo tiempo, existen tres retos inmediatos. El primero consiste en determinar con precisión cómo deberían adaptarse las ecuaciones de Einstein. Esto reviste importancia no solo a longitudes muy pequeñas, sino también a escalas cósmicas. Por ejemplo, la constante de acoplamiento gravitatorio podría variar a lo largo de grandes distancias astrofísicas.

Un segundo problema atañe a la particular naturaleza del espaciotiempo comparada con la del espacio. En la descripción matemática de la gravedad, la diferencia entre el espacio y el tiempo reside en un simple signo. Pero esta aparente nimiedad hace mucho más difícil la búsqueda de la invariancia de escala. Hasta ahora, casi todos los estudios se han basado en la hipótesis de que las fluctuaciones del espaciotiempo producen un punto fijo cuando las fluctuaciones del espacio así lo hacen. Futuros trabajos deberán confirmar este extremo o descartarlo.

El tercer reto se halla relacionado con los gravitones, las hipotéticas partículas cuánticas responsables de la transmisión de la gravedad. Cuando dos gravitones se encuentran, pueden interaccionar y salir despedidos en sentidos opuestos. Esta dispersión de gravitones carece de relevancia experimental, ya que las energías necesarias para observarla en aceleradores de partículas son demasiado elevadas. Sin embargo, sí guardan una relación con la coherencia interna de la teoría. De las particularidades del proceso de dispersión de gravitones puede leerse hasta qué punto la gravedad asintóticamente segura se encuentra bien definida y dónde podrían surgir problemas.

Aunque se trata de un campo de investigación que solo hace poco ha comenzado a recibir cierta atención, ya contamos con algunos indicios de que la gravedad podría ser invariante de escala a cortas distancias. Es cierto que para decidir sobre la viabilidad de una teoría científica no basta con constatar su consistencia matemática interna. Pero, aun con todas las cautelas, podemos afirmar que la gravedad asintóticamente segura ya ha producido sus primeras predicciones compatibles con los resultados experimentales; sin duda, un síntoma muy esperanzador. Nos hallamos convencidos de que esta línea de investigación conducirá, como poco, a importantes progresos en la formulación de una teoría cuántica de la gravedad. IyC

PARA SABER MÁS

Exact evolution equation for the effective potential. Christof Wetterich en *Physics Letters B*, vol. 130, págs. 90-94, febrero de 1993.
Nonperturbative evolution equations for quantum gravity. Martin Reuter en *Physical Review D*, vol. 57, págs. 971-985, enero de 1998.
The asymptotic safety scenario in quantum gravity. Max Niedermaier y Martin Reuter en *Living Reviews on Relativity*, vol. 9, art. 2006-5, diciembre de 2006. Disponible en **www.livingreviews.org/lrr-2006-5**
Asymptotic safety of gravity and the Higgs boson mass. Mikhail Shaposhnikov y Christof Wetterich en *Physics Letters B*, vol. 683, págs. 196-200, enero de 2010.
Mass difference for charged quarks from asymptotically safe quantum gravity. Astrid Eichhorn y Aaron Held en *Physical Review Letters*, vol. 121, art. 151302, octubre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Problemas físicos con muchas escalas de longitud. Kenneth Wilson en *IyC*, octubre de 1979. Reeditado para «Grandes ideas de la física», colección *Temas* de *IyC*, n.º 80, 2015.
Cuarenta años de libertad asintótica. Antonio González-Arroyo en *IyC*, junio de 2013.
La gravedad cuántica, camino de convertirse en ciencia. Sabine Hossenfelder en *IyC*, enero de 2017.



MEDICINA

Regeneración de órganos con fármacos

Un medicamento que se había descartado revela su capacidad de reconstruir órganos dañados por enfermedades o lesiones

Kevin Strange y Viravuth Yin

SAM FALCONER

El biólogo **Kevin Strange** es director ejecutivo de Novo Biosciences y expresidente del Laboratorio Biológico de la Isla Mount Desert (MDIBL), Bar Harbor, Maine.

Viravuth Yin es director científico de Novo y profesor titular del MDIBL.





N RELATO SOBRE MORDEDURAS DE TIBURÓN EN UNA TABERNA ESCOCESA NOS ABRIÓ a nuevas ideas acerca de la reconstrucción de organismos dañados. A comienzos de este siglo, Michael Zasloff, genetista de la Universidad de Georgetown, pronunció una conferencia en la Universidad de St. Andrews sobre diversos antibióticos naturales presentes en pieles de animales. Después de la charla, fue a tomar una copa con otros académicos, y un biólogo marino comentó que los delfines eran atacados con frecuencia por los tiburones, que les causaban enormes heridas, de 45 centímetros de longitud y 12 centímetros de profundidad. De forma sorprendente, los delfines se curaban en unas semanas, sin signos de infección.

Asombrado por semejante rapidez para recuperarse tras atroces lesiones, Zasloff no podía dejar de pensar en esa conversación. En los años siguientes, leyó informes sobre delfines mordidos y habló con biólogos marinos que estudiaban estos animales. En 2011 publicó una carta en el *Journal of Investigative Dermatology* titulada «Observaciones sobre la extraordinaria (y misteriosa) cicatrización de heridas del delfín mular». En ella señalaba que los delfines no parecían limitarse a remendar el desgarro con una cicatriz, lo que produce otros tipos de células, sino que en realidad regeneraban el tejido dañado. Poco después, nos llamó a uno de nosotros. Strange, por entonces presidente del Laboratorio de Biología de la Isla Mount Desert (MDIBL), en Maine, impulsaba la investigación de compuestos naturales y sintéticos que estimularan la regeneración, y Zasloff pensó que algunos de los antibióticos que había descubierto en la piel animal también podrían fomentar este tipo de recuperación. Todo lo que contribuyera a reponer o restaurar las células destruidas por enfermedades o lesiones supondría un gran avance médico.

Seis años después de esa llamada, los tres (Yin, Strange y Zasloff) hemos demostrado que el antibiótico natural MSI-1436, descubierto por Zasloff en un pequeño tiburón, estimula intensamente la regeneración de diversos órganos dañados en el pez cebra y del músculo cardíaco en el ratón. El compuesto libera ciertos «frenos» moleculares que reprimen la capacidad natural que posee el tejido para regenerarse después de una lesión. En ratones afectados por el equivalente de la distrofia muscular en las personas, enlentece la degeneración de los músculos. Todavía estamos experimentando con animales y no hemos demostrado estos efectos en los humanos, pero el MSI-1436 cuenta con una importante ventaja sobre los innumerables compuestos que resultan prometedores en el laboratorio y después fracasan en las personas: ya ha demostrado su seguridad.

En 2007 se había ensayado en personas como posible tratamiento de la obesidad y la diabetes de tipo 2, porque mejoraba la sensibilidad de las células a la insulina. Los estudios, supervisados por la Agencia de Fármacos y Alimentos (FDA, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos, demostraron que el MSI-1436 se toleraba bien en dosis altas, sin causar efectos perjudiciales. Pero el producto se presentaba en forma de líquido que debía inyectarse a diario, lo que no iba a resultar atractivo

EN SÍNTESIS

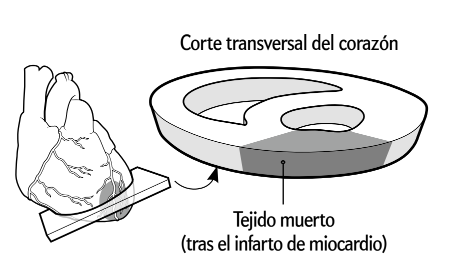
Los tratamientos con células madre acaparan titulares sobre curación y regeneración de distintas partes del cuerpo, pero han tenido poco éxito.

El compuesto MSI-1436 parece más prometedor, según indican los experimentos con animales. Suprime el freno a la capacidad natural del organismo de regenerar las células.

La molécula, destinada en un principio al tratamiento de la diabetes y de la obesidad, pasó con éxito las pruebas de seguridad en personas, una enorme ventaja en el desarrollo de un medicamento.

Regenerador corporal

En circunstancias normales, la capacidad de las células y los órganos para regenerarse tras una lesión es limitada. Después de un infarto de miocardio, por ejemplo, los factores de crecimiento y las citocinas acuden al corazón para estimular su reconstrucción, pero una enzima bloquea las señales de estas moléculas. Las células cardíacas muertas no se reponen. Sin embargo, en ratones de experimentación con el corazón dañado, la inyección de MSI-1436 inhibió esa enzima, con el resultado de un músculo cardíaco nuevo en perfecto funcionamiento.



Curación bloqueada

Factores de crecimiento y citocinas

1 Los factores de crecimiento y las citocinas se unen a las proteínas RTK, las cuales facilitan el envío de señales de regeneración a la célula.

Membrana celular

Fosfato

RTK

PTP1B

Membrana nuclear

ADN

2 La enzima PTP1B detiene las RTK mediante la eliminación de su grupo fosfato, que es esencial para la transmisión de señales. Así, las señales de regeneración no alcanzan el ADN de la célula.

3 Al interrumpirse la señal, las células del músculo cardíaco muertas no se reponen con otras nuevas sanas. Queda una cicatriz de tejido inerte que debilita el corazón.

Muerte celular y fibrosis

Curación desbloqueada

MSI-1436

Proteínas transmisoras de señales

ADN

2 El MSI-1436 bloquea la PTP1B, y ello impide que la enzima elimine los fosfatos de las RTK. En consecuencia, las señales de regeneración se transmiten sin obstáculos a través de una serie de proteínas hasta el ADN celular.

3 Las señales desencadenan la regeneración celular. Se desarrolla músculo cardíaco nuevo para reponer el tejido lesionado y restaurar la capacidad de bombeo de sangre del órgano.

Tejido restaurado

para los pacientes, que ya disponían de otras opciones más fáciles de administrar, como los comprimidos orales. De modo que los laboratorios farmacéuticos no prosiguieron su desarrollo.

En cambio, para las células dañadas que es preciso regenerar, no abundan hoy en día las opciones médicas. Las células madre, de naturaleza no especializada, han protagonizado muchos titulares. Con los estímulos adecuados, se convierten en la miríada de tipos celulares altamente diferenciados que componen el cuerpo humano y, en teoría, podrían reparar las partes dañadas. Por desgracia, pese a numerosos años de ensayos clínicos y otras pruebas, los trasplantes de células madre se ven lastrados por su falta de eficacia y algunos problemas graves. La única aplicación generalizada en la actualidad es en trasplantes de médula ósea para tratar enfermedades de las células sanguíneas. Sin embargo, el MSI-1436, con un perfil de seguridad demostrado, podría llegar a ser un valioso medicamento regenerativo para reparar la destrucción causada por los infartos de miocardio y quizá también por otras enfermedades graves.

PROYECTO DE RESTAURACIÓN

Muchos animales cuentan con unas facultades de regeneración pasmosas [*véase* «Regeneración de las extremidades», por Ken Muneoka, Manjong Han y David M. Gardiner; Investigación y Ciencia, junio de 2008]. A las salamandras les vuelven a crecer

CAMPBELL MEDICAL ILLUSTRATION

patas enteras después de su amputación. La lamprea, un pez parecido a la anguila, tiene la capacidad de reparar la médula espinal seccionada. El pez cebra, especie popular en los acuarios y muy empleada en la investigación biomédica, puede regenerar estructuras dañadas, como el corazón, los riñones, el páncreas y las aletas. Para cualquier tejido u órgano en el que se piense, casi siempre habrá un animal capaz de regenerarlo con facilidad.

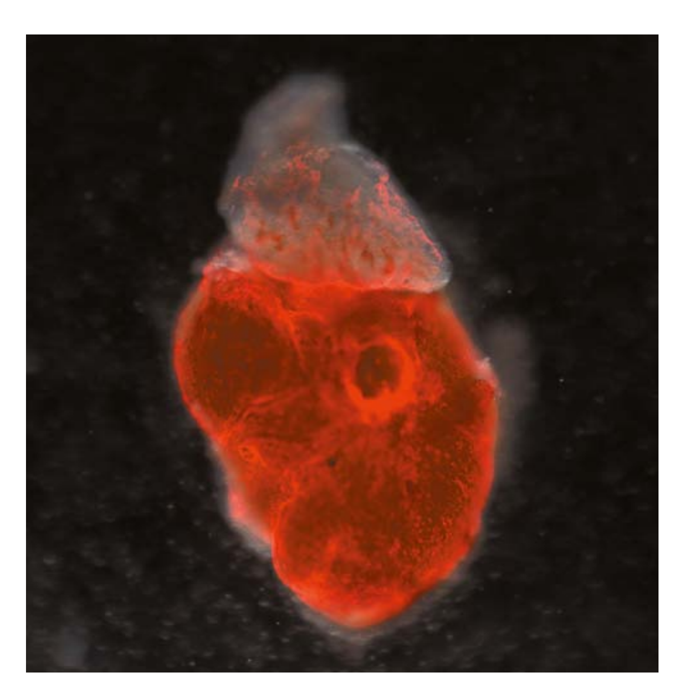
Incluso los humanos no nos hallamos del todo exentos de los procesos de nuevo crecimiento y reparación. Nuestra capacidad parece más limitada, pero renovamos constantemente las células cutáneas, sanguíneas e intestinales. El músculo incorpora células nuevas tras pequeñas lesiones. Y, como el hígado de Prometeo que se regeneraba cada día, el nuestro también vuelve a crecer si sufre daños parciales. Por tanto, nuestras células poseen esta facultad, si bien se encuentra amortiguada o anulada, sobre todo al envejecer. El mero hecho de contar con ella nos llevó a pensar en la posibilidad de reactivarla mediante la señal molecular adecuada. Pero, claro, primero teníamos que identificar esa señal. Y el lugar lógico donde buscarla era entre la fauna dotada de propiedades de curación rápida.

Zasloff, en su búsqueda de antibióticos en los animales, se había topado con los aminoesteroles, la clase de moléculas a la que pertenece el MSI-1436. También tenían el potencial de estimular la regeneración porque podían regular ciertas actividades celulares, como el crecimiento. Decidimos poner a prueba su potencial en el pez cebra. Como vertebrado, esta especie comparte con las personas muchos de los órganos principales, y existe un equivalente humano para alrededor del 70 por ciento de sus genes. Los embriones son transparentes, lo que facilita el estudio de los cambios anatómicos. Deseábamos averiguar si alguno de los aminoesteroles lograba acelerar y mejorar la capacidad de regenerar tejidos del pez.

Comenzamos con una sencilla prueba de amputación: seccionamos parte de la cola y añadimos distintos aminoesteroles al agua del tanque. No sucedió nada hasta que contamos con la ayuda de Helen Roberts, becaria del laboratorio de Yin, quien preparó métodos para inyectar sustancias directamente en el pez cebra, en vez de añadirlas al agua. Con la inyección de MSI-1436, la regeneración de la aleta caudal se aceleró en más del 300 por ciento. Su reconstrucción solo tardó entre tres y cuatro días, en vez de entre 10 y 12, y no se observaron signos de crecimiento anómalo. Pedimos a Roberts y a un técnico de laboratorio que repitieran los experimentos de manera independiente, con diferentes compuestos de comparación, y nos aseguramos de que no supieran qué inyectaban a los peces. El MSI-1436 funcionó en todas las situaciones, no así los demás productos. Fue asombroso. El hallazgo despertó en nosotros un enorme entusiasmo.

¿Cómo pudo el MSI-1436 estimular la regeneración de forma tan espectacular? Algunos científicos habían estudiado su efecto en las células, y después de que realizáramos nuevos experimentos, la respuesta se nos hizo evidente: el MSI-1436 inhibía la proteína tirosina fosfatasa 1B (PTP1B), una enzima con diversas funciones, entre las que figura la regulación del crecimiento de las células nuevas. Esta es una tarea importante, porque el crecimiento generalizado sin control de un órgano deriva en alteraciones funcionales o degeneración cancerosa. La PTP1B es, en esencia, un freno para la regeneración celular y nuestro compuesto lo había soltado, pero solo en las zonas dañadas, de forma muy localizada, dirigida y controlada.

La PTP1B ejerce su efecto inhibidor al interferir con unas proteínas clave: las tirosina-cinasas receptoras (RTK). Estas se ubican en el interior de la membrana celular y forman parte de las vías de señalización que se inician en el exterior y llegan al interior de la célula; las señales que discurren por la vía ordenan a la célula crecer y dividirse. Para activarse y transmitir dichas señales, las RTK deben unirse a un grupo fosfato. La PTP1B se interpone, separando estos grupos. Al no haber fosfato, las RTK no transmiten señales y la célula no se regenera. Pero nuestro compuesto, MSI-1436, despoja a la PTP1B de su capacidad de eliminar los fosfatos. Inutilizados los frenos, las RTK encuentran vía libre para promover la regeneración celular.



EL CORAZÓN DE UN PEZ CEBRA tratado con MSI-1436 después de una lesión regenera con rapidez el músculo y recupera la capacidad de bombeo de la sangre.

CHRISTINA A. DYKEMAN Y LABORATORIO BIOLÓGICO DE YIN, LABORATORIO BIOLÓGICO DE LA ISLA MOUNT DESERT

ENFERMEDAD CARDÍACA E INFARTO DE MIOCARDIO

Además de la aleta caudal, descubrimos que nuestro inhibidor de la PTP1B estimulaba la regeneración del corazón del pez cebra. Este hallazgo es muy importante para el ser humano, que no tiene aletas pero sí corazón, un órgano que a menudo necesita ayuda. Las enfermedades cardiovasculares son la primera causa de muerte en el mundo, con unos 18 millones de fallecimientos al año, el 85 por ciento de los cuales se deben a infarto de miocardio e ictus. Las células musculares que mueren en un ataque cardíaco no se regeneran; en el lugar que ocupan se forma una cicatriz que aumenta el riesgo de sufrir otro infarto. En los últimos 45 años, la búsqueda de tratamientos para reparar el corazón, incluido el trasplante de células madre, ha resultado infructuosa.

Por ello, tras constatar la utilidad del MSI-1436 en los peces, pasamos a examinarlo en ratones, un modelo animal ampliamente utilizado en la investigación cardíaca. Indujimos infartos de miocardio en los roedores y luego les inyectamos MSI-1436 cada tres días a lo largo de cuatro semanas. La capacidad de bombear sangre del órgano mejoró en más del doble, la cantidad de tejido cicatricial se redujo a la mitad y las células musculares de la zona de la lesión se multiplicaron en cerca del 600 por ciento. El MSI-1436 es la única molécula de pequeño tamaño que se sepa que ejerce este efecto.

Hace poco empezamos a investigar el compuesto en ratones con un tipo de enfermedad completamente diferente: un modelo

murino de distrofia muscular de Duchenne, un trastorno degenerativo de los músculos de carácter progresivo, muy distinto del daño súbito de un infarto de miocardio. Nuestros datos preliminares indican que el MSI-1436 estimula la regeneración celular de manera suficiente como para que los músculos esqueléticos y cardíaco compensen el deterioro. No detiene la enfermedad, pero podría mitigar sus efectos.

DE LOS ANIMALES A LAS PERSONAS

Un buen presagio para el ser humano es que el compuesto estimula la regeneración tisular tanto en el pez cebra como en el ratón adulto, especies separadas por unos 450 millones de años de evolución. Dada la eficacia del MSI-1436 en animales tan distintos, lo más probable es que actúe sobre vías celulares ampliamente conservadas a lo largo de la evolución en distintos organismos. El hecho de que tales vías existan también en la especie humana y se puedan manipular de igual manera eleva las probabilidades de éxito.

Ahora bien, examinar posibles fármacos en las personas, que pueden tener características diversas, es muy distinto de los estudios rigurosamente controlados en animales de laboratorio. El riesgo de fracaso en los ensayos clínicos es elevado. Y aunque hay buenos motivos para el optimismo, lo cierto es que no sabremos si el MSI-1436 resulta eficaz en el tratamiento del infarto de miocardio hasta que no lo ensayemos en los pacientes. Como primer paso en esa dirección, hemos iniciado pruebas con el compuesto en un modelo porcino de infarto de miocardio, con financiación de los Institutos Nacionales de la Salud de Estados Unidos. El corazón del cerdo es muy similar al de las personas, y el tamaño del animal nos permite imitar un ataque cardíaco humano y sus primeras etapas de tratamiento mucho mejor que en el ratón. Si los resultados en esta especie son positivos, tendremos buenas opciones de obtener la autorización de la FDA para realizar ensayos clínicos.

En nuestros estudios prestamos especial atención a los signos del cáncer. La medicina regenerativa se enfrenta al riesgo de que los tratamientos que estimulan el crecimiento y la reparación de los tejidos desencadenen una proliferación celular descontrolada, que es la característica distintiva del cáncer. Creemos que este riesgo es menor con el MSI-1436. Los amplios estudios de toxicidad ya efectuados con el compuesto cuando se investigaba como medicamento para la diabetes y la obesidad se diseñaron para detectar problemas como el cáncer. No se halló ninguno y la FDA consideró que el producto era seguro para utilizarlo en los pacientes. Inhibir la molécula PTP1B también parece resultar bastante inocuo. El gen responsable de su producción se suprimió por primera vez en 1999 en ratones que después se estudiaron exhaustivamente. No mostraron signos de crecimiento tumoral, lo que permite pensar que incluso la inhibición a largo plazo de PTP1B no provoca cáncer. Por otra parte, es previsible que el tratamiento con MSI-1436 para estimular la regeneración tisular solo dure pocas semanas o meses.

Por último, nuestros experimentos indican que el MSI-1436 actúa únicamente en el lugar de la lesión, sin desatar ningún tipo de hiperactividad cancerosa en el tejido normal. En los peces cebra y los ratones lesionados que recibieron el compuesto, no observamos crecimiento tisular excesivo ni anomalías en la forma de los tejidos o de los órganos (un signo de proliferación maligna). Pusimos a prueba esta idea en embriones unicelulares de pez cebra, un momento muy sensible de su desarrollo. Tras inyectarles el producto durante 14 días seguidos, se desarrollaron hasta convertirse en adultos normales. El paso de una célula a un animal adulto es, evidentemente, un proceso complejo que requiere una ingente proliferación y diferenciación celular. Numerosos fármacos y factores ambientales lo desequilibran con facilidad si se administran en una fase tan temprana. Así que resulta tranquilizador que el MSI-1436 no lo haga.

VENTAJA NATURAL

Es posible que los animales respondan bien al compuesto porque este se deriva de ellos. No se descubrió en un ratón de laboratorio genomanipulado, en células cultivadas en un centro médico o entre decenas de miles de moléculas sintéticas en un laboratorio farmacéutico. Nuestros hallazgos surgieron de las lecciones que aprendimos de los delfines, los tiburones y los peces cebra. El MDIBL, donde sacamos provecho de esas enseñanzas, se fundó precisamente para ese fin. Nuestra institución nació como centro de investigación marina en la costa de Maine en 1898, cuando los biólogos deseaban una relación inmediata con el mundo natural que intentaban comprender.

Es una lástima que la gran empresa de investigación biomédica y, en particular, la industria farmacéutica se hayan alejado de este vínculo. Sin duda, las moléculas diseñadas por ordenador tienen por delante un importante cometido. Pero el biólogo venezolano Alejandro Sánchez Alvarado, del Instituto de Investigación Médica Stowers, que no participó en nuestros estudios, nos dijo que el MSI-1436 «es un excelente caso práctico de lo que sucede cuando los científicos deciden apartarse del camino conocido y buscan en la naturaleza las respuestas a los problemas médicos difíciles».

PARA SABER MÁS

Observations on the remarkable (and mysterious) wound-healing process of the bottlenose dolphin. Michael Zasloff en *Journal of Investigative Dermatology*, vol. 131, n.º 12, págs. 2503–2505, diciembre de 2011.

Rethinking differentiation: Stem cells, regeneration, and plasticity. Alejandro Sánchez Alvarado y Shinya Yamanaka en *Cell*, vol. 157, n.º 1, págs. 110–119, 27 de marzo de 2014.

The protein tyrosine phosphatase 1B inhibitor MSI-1436 stimulates regeneration of heart and multiple other tissues. Ashley M. Smith et al. en *npj Regenerative Medicine*, vol. 2, artículo n.º 4, 3 de marzo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Retos de la medicina regenerativa. María J. Barrero y Juan C. Izpisúa Belmonte en *IyC*, noviembre de 2012.

Avances en medicina regenerativa. Ferris Jabr, Christine Gorman y Katherine Harmon en *IyC*, junio de 2013.

Órganos humanos fabricados dentro de animales. Juan C. Izpisúa Belmonte en *IyC*, enero de 2017.

por Ricardo Aguilar

El escarpe de Émile Baudot

Recién incluido en el Parque Nacional de Cabrera, aporta hábitats y especies únicas

El Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera ha sido ampliado a principios de este año con más de 80.000 hectáreas de superficie marina. Se ha convertido así en el más extenso de la red de parques nacionales españoles, incluidos los terrestres.

Uno de los sistemas que aún no se hallaban representados en la red eran los «veriles y escarpes de pendiente pronunciada». El parque de Cabrera incorpora ahora el escarpe de Émile Baudot, uno de los mayores del Mediterráneo, con más de 2000 metros de profundidad y unos 250 kilómetros de longitud.

Las aguas de Émile Baudot son conocidas por su elevada concentración de grandes especies migradoras, como cetáceos, mantas raya y tiburones, pero sus hábitats bentónicos también están aportando hallazgos sorprendentes. Justo antes de asomarnos al escarpe, observamos fondos blandos con altas densidades de crinoideos, braquiópodos y gusanos tubícolas.

También, a poca distancia de los enormes acantilados submarinos, existen algunas cuevas de profundidad que proporcionan cobijo a multitud de especies de peces, corales y equinodermos.

Sobre las escarpadas paredes, habitualmente cubiertas por antiguos arrecifes fósiles, se desarrollan comunidades de corales, gorgonias y esponjas (*imagen de fondo*), pero también medran moluscos como la ostra gigante (*Neopycnodonte zibrowii*), un bivalvo que puede vivir 500 años y que se creía extinto hasta su reciente redescubrimiento en 2009. En Émile Baudot se encuentran las agregaciones más profundas de este molusco registradas en el mundo.

Entre los grandes farallones aparecen especies de peces típicas de los fondos batiales, como los granaderos (Macrouridae), los peces víbora y diablo (Stomiidae), los anguiliformes o los móridos, entre otros, pero también crustáceos de profundidad, como los camarones soldado (*Plesionika* spp.), las langostillas (Galatheoidea), las langostas (*Palinurus* spp.) o la centolla de fondo (*Paromola cuvieri*). Esta última levanta las patas posteriores para sujetar objetos (gorgonias, esponjas, pero también basuras marinas) con los que esconderse y protegerse.

Las primeras investigaciones en la zona han sido suficientemente reveladoras como para conseguir que el escarpe haya sido incluido dentro del parque nacional, pero las grandes paredes submarinas aún tienen muchos descubrimientos que ofrecer.

—Ricardo Aguilar es director de investigación y expediciones de Oceana, en Madrid





LAS OSTRAS GIGANTES (*Neopycnodonte zibrowii*) pueden vivir 500 años y formar densas agregaciones. Esta imagen se obtuvo a 1005 metros de profundidad.

EL PEZ ARMADO (*Peristedion cataphractum*) ocupa un amplio intervalo de profundidades, aunque resulta más habitual en los lechos fangosos del batial superior.

EL CRINOIDEO MEDITERRÁNEO (*Leptometra phalangium*) se concentra en grandes comunidades de millones de individuos, estructurando el fondo marino y generando un hábitat sensible de gran importancia para juveniles de especies comerciales.

UN CENTOLLO DE PROFUNDIDAD (*Paromola cuvieri*) utiliza una gorgonia (*Callogorgia verticillata*) para guarecerse. Cada vez es más habitual ver cómo estas especies van sustituyendo a las gorgonias y esponjas protectoras por basuras.

por Joseph D. Martin



Joseph D. Martin es profesor asociado del Departamento de Historia y Filosofía de la Ciencia de la Universidad de Cambridge.

El estado sólido y el nuevo mapa de la física

El desarrollo de la física del estado sólido transformó la configuración interna de la disciplina tras la Segunda Guerra Mundial

¿Qué es la física del estado sólido? La respuesta parece sencilla: el estudio de las propiedades de la materia sólida. Pero esta definición deja de lado aspectos esenciales. Para comprender la evolución de esta rama de la física a lo largo del siglo xx, debemos empezar por preguntarnos cómo llegó a convertirse en una especialidad de la disciplina.

La física del estado sólido no existía en 1939, cuando un estudiante de la Universidad Brown, Bernard «Bern» Porter, dibujó un mapa de la física. En apenas una década, sin embargo, contaba ya con una división propia en el seno de la Sociedad Americana de Física, y a finales del siglo xx era la mayor especialidad de la física, conocida para entonces con el nombre de física de la materia condensada. Este rápido crecimiento es tanto más sorprendente cuanto no está nada claro cómo la habría incluido Porter en su mapa, de haberlo revisado una década después. La física del estado sólido no era un conjunto coherente de conceptos y métodos que pudiera aparecer como una isla, un continente o cualquier otro elemento natural del paisaje, sino que estaba relacionada con casi todas las regiones del mapa. Era percibida como una categoría poco común. Al incorporar un capítulo dedicado a la física del estado sólido en la segunda edición del manual del Instituto Americano de Física, su editor observó que «añadir un capítulo con este título a las disciplinas convencionales de la mecánica, el calor, la acústica, etcétera, es como intentar clasificar a las personas entre mujeres, hombres, niñas, niños y citaristas».



EL MAPA DE LA FÍSICA de Bern Porter (1939) representa la física en términos de fenómenos naturales.

Para comprender el auge de la categoría debemos atender a los cambios de actitud hacia la física en los Estados Unidos, en particular hacia la investigación industrial y aplicada. A principios del siglo xx, el término *física* se refería a los fenómenos naturales y un *físico* investigaba las leyes que los gobernaban, lo que excluía a los físicos aplicados o industriales. A mediados de siglo se empezó a cuestionar esta noción. En 1943, William Hansen, físico de la Universidad Stanford cuyas investigaciones habían llevado al desarrollo del klistrón (una válvula de vacío amplificadora de microondas), rebatió la afirmación de su colega David Webster, según la cual la física consistía en descubrir leyes naturales: «Este criterio es demasiado exigente. ¿Cuántos físicos conoces que hayan descubierto una ley de la naturaleza? Pocos de nosotros hemos tenido ese privilegio, pero eso no quita valor al trabajo del resto».

El resto se mostró de acuerdo. El estado sólido era una categoría lo suficientemente amplia como para incluir áreas muy diversas y evitar la marginalización de la física aplicada. La nueva subdisciplina cubría tanto el ámbito académico como el industrial, y unía áreas hasta entonces disociadas.

La rápida expansión de esta categoría tras la guerra responde a dos motivos. En primer lugar, su uso favorecía a los físicos aplicados, tradicionalmente desatendidos por las instituciones emblemáticas de la física estadounidense. En segundo lugar, al haber sido creada para hacer frente a problemas profesionales y no para construir un conjunto de conceptos o prácticas, podía agrupar

a físicos de muchas especialidades, no solo generalistas.

También incluía investigaciones que apenas tenían que ver con los sólidos. El estudio clásico de John Van Vleck sobre la susceptibilidad magnética de los gases formaba parte de su canon. El primer máser, construido por el grupo de Charles Townes, estaba basado en el gas de amonio. Y el descubrimiento de la superfluidez del hidrógeno, realizado por Pyotr Kapitsa en 1937, propició un fructífero programa de investigación del que los físicos del estado sólido se apropiaron también. Al ser una categoría artificial, permitía la incorporación de nuevas áreas. Los físicos del estado sólido no tenían reparo en acoger en su comunidad a los físicos que investigaban las propiedades de la materia agregada y que no contaban con otros espacios profesionales.

Claro que esa tolerancia tenía sus límites. Creada para afrontar los retos profesionales del período de posguerra, no es de extrañar que la denominación «física del estado sólido» dejara de ser pertinente al cambiar las circunstancias. A partir de 1960 empezó a usarse la expresión «física de la materia condensada», que reflejaba el interés por los estados no sólidos de la materia y resaltaba el problema cuántico de los muchos cuerpos.

Entre otras ventajas, la nueva denominación proyectaba mayor consistencia conceptual. Durante el período de dominio de la física de los semiconductores no importó demasiado que las técnicas de la física del estado sólido fueran igualmente relevantes en el caso de líquidos, moléculas, plasmas y otros materiales no sólidos. Pero en los años setenta las fronteras cambiaron, al adquirir preeminencia los fenómenos críticos como las transiciones de fase, la dinámica de fluidos no lineal, la investigación sobre el helio líquido y otras áreas que poco o nada tenían que ver con los sólidos. No se podía seguir ignorando la falta de adecuación del término original.

La nueva denominación hablaba también del rigor intelectual. «Materia condensada» evocaba mejor que «estado sólido» los complicados cálculos cuánticos del problema de los muchos cuerpos, en un momento en que los físicos del estado sólido necesitaban subrayar sus aportaciones conceptuales. Durante la guerra de Vietnam, Estados Unidos redujo la inversión en investigación fundamental en la especialidad, al tiempo que se incrementaba la inversión en física de altas energías. El Gobierno y los inversores privados requerían aplicaciones técnicas a corto plazo.

Los descubrimientos en áreas como la de los fenómenos críticos permitieron a la física del estado sólido reclamar parte del prestigio intelectual del que gozaba la física de altas energías. En 1972, el físico de la materia condensada Philip W. Anderson publicó en la revista *Science* un artículo crucial, «Más es diferente», en el que argumentaba que cada nueva escala de complejidad ofrecía una cornucopia de cuestiones fundamentales intelectualmente estimulantes. Al abordar fenómenos físicos más complejos, los físicos de la materia condensada estaban abriendo nuevas fronteras conceptuales. La adopción de la categoría «física de la materia condensada» no era un simple cambio de nombre: reflejaba las nuevas prioridades, intelectuales y profesionales, de la física estadounidense.

Los físicos de la materia condensada tenían que defender el valor intelectual de su especialidad ante la acusación de que practicaban una «física sucia» (*Schmutzphysik*) o una «física del estado escuálido». Desde mediados de los sesenta venían expresando su preocupación por los recursos dedicados a los grandes aceleradores, que podrían distribuirse de modo más equitativo. La superioridad numérica de la que gozaban desde hacía décadas, junto al resurgir de su programa intelectual, reforzó a los líderes de la disciplina. A finales de los noventa, los físicos de la materia condensada podían oponerse a la financiación del Supercolisionador Superconductor argumentando no solo que ocupaban un lugar central en la disciplina, sino que sus objetivos representaban mejor los de la física en su conjunto.

La historia del ascenso de la física de la materia condensada es, pues, una historia sobre el uso y el significado de las categorías de la física. A principios del siglo xx los físicos podían cartografiar la disciplina como lo hizo Porter, a partir de las categorías que percibían en el mundo natural. Pero este método estaba impregnado de ideología, porque presuponía cierta concepción de la física y discriminaba entre los físicos que lideraban la disciplina desde el centro y los que trabajaban en la periferia. La forma en que los científicos delimitan su trabajo determina el modo en que este se lleva a cabo y el valor que se le asigna.

La concepción de la física prevalente a principios del siglo xx había relegado a los físicos aplicados a la periferia. Tras la Segunda Guerra Mundial, la física del estado sólido asistió a la consolidación profesional de los físicos industriales en el seno de la disciplina. A su vez, la física de la materia condensada ayudó a reorientar la especialidad una vez agotada la primera categoría. En ambos casos se trataba de redibujar el mapa de la física de modo que las periferias (la física aplicada, en el primer caso, la teoría de los muchos cuerpos, en el segundo) se acercaran al centro. Pero no era un proceso tan sencillo como establecer la frontera de un nuevo territorio, anexionándolo a un mapa preexistente y dándole un nombre. La creación de los campos «física del estado sólido» o «física de la materia condensada» obligó a repensar la cuestión fundamental de cómo trazar una frontera.

El historiador Daniel Kevles se ha hecho eco de la percepción común según la cual la física «es lo que hacen los físicos». El desarrollo de la física de la materia condensada sugiere que la física es lo que los físicos *deciden* que sea. La física del estado sólido o de la materia condensada ganó prominencia porque los físicos reconocieron el poder de las categorías y las modelaron según sus necesidades. IyC

Artículo adaptado del libro *Solid state insurrection: How the science of substance made American physics matter* (University of Pittsburgh Press, 2018).

PARA SABER MÁS

The physics business in America, 1919-1940: A statistical reconnaissance. Spencer R. Weart en *The Sciences in the American Context: New Perspectives*. Dirigido por Nathan Reingold. Princeton University Press, 1979.
Out of the crystal maze: Chapters from the history of solid state physics. Dirigido por Lillian Hoddeson, Earnest Braun, Jürgen Teichmann y Spencer Weart. Oxford University Press, 1992.
The physicists: The history of a scientific community in modern America. Daniel J. Kevles. Harvard University Press, 1995.
Booms, busts and the world of ideas: Enrollment pressures and the challenge of specialization. David Kaiser en *Osiris* 27, págs. 276-302, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Philip W. Anderson: El genio hosco de la física de la materia condensada. John Horgan en *IyC*, marzo de 1995.
¡Calla y calcula! David Kaiser en *IyC*, abril de 2014.
De la superconductividad al bosón de Higgs. Miguel Ángel Vázquez-Mozo en *IyC*, julio de 2014.

por Fernando T. Maestre Gil

Fernando T. Maestre es investigador distinguido de la Universidad de Alicante, donde dirige el Laboratorio de Ecología de Zonas Áridas y Cambio Global.



Labor científica y bienestar

Nueve normas para un entorno de trabajo más saludable en ciencia

La competencia, la presión por publicar en revistas de prestigio, las largas jornadas laborales y la incertidumbre que generan los contratos temporales y la movilidad geográfica hacen de la ciencia un trabajo estresante. No es sorprendente, pues, que muchos investigadores muestren frustración o describan su trabajo como tóxico; ni tampoco lo es la elevada prevalencia de la ansiedad y la depresión entre los doctorandos. A pesar de que cada vez hay una mayor preocupación por crear entornos de trabajo más saludables en ciencia, no hay muchos ejemplos sobre cómo hacerlo. El pasado abril publiqué en *PLOS Computational Biology* unos principios básicos que sigo como investigador principal para conseguirlo, y los resumo a continuación.

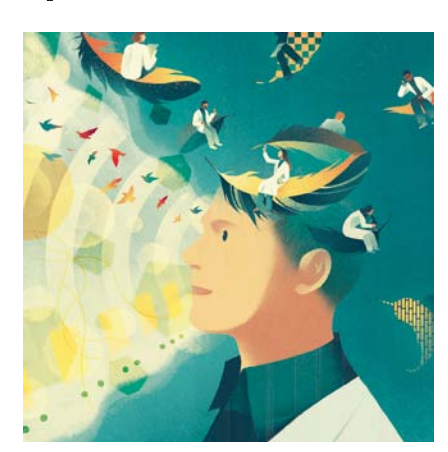
Las personas primero. Cuando somos felices, trabajamos con mayor eficacia y somos más creativos. Por ello, el bienestar de los miembros de mi grupo es prioritario. No tengo una varita mágica para solucionar todos sus problemas, pero procuro ponerme en la piel del otro, prohibir todo tipo de acoso y discriminación, ser sensible a las distintas situaciones personales o de salud y, sobre todo, escucharles en todo lo que tiene que ver con su trabajo.

Permitir que cada uno tenga su horario. Nunca controlo los horarios de mis colaboradores. Algunos vienen pronto para poder disfrutar de las tardes libres; otros hacen lo contrario; o prefieren trabajar en casa para analizar los datos, escribir, o para conciliar trabajo y obligaciones familiares. Como científicos, debemos ser evaluados por nuestros resultados, no por el número de horas que pasemos en el despacho o el laboratorio.

Es de bien nacidos ser agradecidos. A menudo expreso gratitud por el trabajo que realizan todos los miembros de mi grupo. La cultura de la gratitud tiene efectos positivos en el bienestar de cada uno y ayuda a construir la confianza mutua.

Los miembros de mi grupo trabajan conmigo, no para mí. Es bastante común encontrar laboratorios con claras jerarquías. Ello provoca relaciones tóxicas y limita la capacidad de pensar de forma crítica. Si bien los investigadores principales debemos determinar prioridades y tomar decisiones acerca de la labor del grupo, es un error considerar a nuestros colaboradores meros ejecutores de instrucciones.

Colaborando se trabaja mejor. La colaboración es una piedra angular de la ciencia moderna y los investigadores principales debemos fomentarla. Ello puede conseguirse mediante proyectos conjuntos en los que intervengan todos o parte de los miembros, o facilitando que doctorandos y posdoctorandos establezcan su propia red de contactos y participen en la supervisión de estudiantes.



Cada persona es única. Nunca debemos comparar a nuestros colaboradores entre sí o con nosotros cuando estábamos en su situación. El rendimiento de cada uno depende en buena medida de sus circunstancias personales y metas profesionales. Mi trabajo es contribuir a que todos desarrollen su máximo potencial y lleguen tan lejos como puedan o quieran.

Respetar los tiempos de descanso. En numerosas ocasiones he dado prioridad a mi trabajo sobre mi vida personal en aras del éxito y la productividad. Pero, a lo largo de los años, me he dado cuenta de que tener una vida más equilibrada y disfrutar del tiempo libre no ha disminuido mi productividad, sino que la ha aumentado. Muchos doctorandos y posdocs priorizan su trabajo para poder dedicarse a la ciencia y, aunque respeto esa conducta, les advierto de las consecuencias negativas para su salud y bienestar a largo plazo. Todos tenemos momentos puntuales en los que debemos trabajar duro, pero estos deben ser una excepción y no la norma.

Al César lo que es del César. A menudo, los investigadores principales han determinado la autoría de las publicaciones o han participado por defecto en todas ellas, independientemente de su aportación. Esta práctica limita la productividad y la creatividad y genera tensiones y frustración. Los investigadores principales debemos discutir abiertamente las autorías de los artículos; permitir que firmen todos los que han contribuido de forma importante, incluidos los técnicos; dejar la última posición a los posdocs cuando ellos han tenido la idea de la investigación pero no la han liderado; no firmar cuando no hemos tenido un papel relevante; y dejar clara en conferencias y conversaciones con colegas la autoría intelectual de las publicaciones e ideas que salen del grupo.

El rechazo es la norma en ciencia. Los investigadores vemos rechazados constantemente nuestros artículos, proyectos y solicitudes de trabajo. Aunque ello siempre duele, debemos asimilarlo como una parte fundamental de nuestro trabajo. Algunas iniciativas para normalizarlo consisten en elaborar de un CV de fracasos, compartir los rechazos en las redes sociales y discutir abiertamente con nuestro grupo los motivos de estos.

La aplicación de estas reglas contribuiría sin duda a mejorar las condiciones de trabajo de miles de científicos en todo el mundo. No hay que olvidar que la ciencia es como una maratón: si corres demasiado rápido durante los primeros kilómetros puedes verte obligado a abandonar antes de llegar a la meta. Así que ayudemos a nuestros compañeros a disfrutar (y a finalizar) esta apasionante carrera promoviendo un ambiente de trabajo más saludable. IyC

JASU HU

por Pere Castells



Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es colaborador del proyecto Gastrocultura Mediterránea y Gastro-Ventures.

El plancton comestible

Sabor de mar en el plato

El término plancton, del griego *planktón* («que va a la deriva»), fue propuesto en 1887 por el biólogo marino de la Universidad de Kiel Victor Hensen. Consciente de la importancia que podían entrañar esos diminutos organismos errantes, consiguió financiación para llevar a cabo un estudio extensivo a escala mundial. Así, el 15 de julio de 1889 partía de Kiel la Expedición Plancton, un proyecto de investigación oceanográfica que arrojaría luz sobre la diversidad e importancia ecológica de estos habitantes del planeta azul.

Distinguimos hoy cuatro tipos de plancton: el fitoplancton, que realiza la fotosíntesis y se halla asociado a las microalgas; el zooplancton, de naturaleza animal; el bacterioplancton, formado por bacterias y clave para la descomposición, y el virioplancton, formado por virus y de gran relevancia ecológica. El plancton es muy sensible a cualquier cambio en el ambiente, por lo que es muy utilizado para obtener información sobre el estado de conservación de un ecosistema.

Además de en el sector farmacéutico y cosmético, el plancton está hallando también aplicaciones en el campo de la alimentación. Al principio se utilizaba solo en la producción de comida para peces en acuarios y piscifactorías, pero desde hace unos años se usa también en elaboraciones gastronómicas. La proeza se debe a la empresa Fitoplancton Marino, que desde 2008 se propuso llevar al consumo alimentario humano una microalga, *Tetraselmis chuii*. Tras identificar esta especie en la explotación acuícola Veta la Palma, en el Parque Natural de Doñana, investigaron la forma de mejorar la eficiencia de su cultivo.

En 2014 obtuvieron el permiso de las autoridades europeas para comercializar su plancton marino, que fue catalogado como «nuevo producto alimentario» (*novel food*) —una autorización muy difícil de conseguir ya que, por motivos de seguridad alimentaria, requiere el cumplimiento de unos requisitos muy estrictos.

La producción del plancton comestible se basa en el cultivo (en condiciones controladas de luz y temperatura) de microalgas, a las que se suministra dióxido de carbono a través de unos reactores que también hacen que el agua se mueva continuamente. Tras un período de crecimiento de unos cuatro meses, el plancton se centrifuga. Se obtiene así una pasta gelatinosa, que se congela y se liofiliza para conservar las propiedades organolépticas y nutricionales, y garantizar una caducidad a muy largo plazo.



PLANCTON MARINO, el nuevo potenciador del sabor a mar.

CORTESÍA DE FITOPLANCTON MARINO

El desarrollo de este producto alimentario se ha llevado a cabo junto con Ángel León, del restaurante gaditano Aponiente (El Puerto de Santa María). Su investigación sobre las aplicaciones culinarias han sido clave para que el plancton marino tenga un gran valor gastronómico. Destaca por su versatilidad. Se puede utilizar directamente en polvo o hidratado, forma en que recupera la textura original. En el Aponiente le han dado múltiples usos: desde una degustación servida en el dorso de la mano del cliente, hasta propuestas más refinadas, como la *Cococha al pil pil de plancton*, o derivados, como la sal y el aceite de plancton. El restaurante El Faro de El Puerto, en la misma localidad, ofrece en su carta de 2019 *Espárragos a la plancha con sal de plancton*.

Este nuevo ingrediente reúne algunas de las características de la cocina del futuro: sabor a mar y sostenibilidad. De ahí que numerosos cocineros de renombre lo hayan incorporado en sus creaciones. Iker Erauzkin, del Espacio Uma (Barcelona), en su postre *Mousse de chocolate blanco con guisantes y plancton*. Los hermanos Torres en el *Consomé cítrico de galeras con plancton, erizos y tinta de calamar*. Begoña Rodrigo, de La Salita (Valencia), en la *Fideuá con plancton marino*. Y el Celler de Can Roca (Gerona) en el *Brioche de plancton*.

Un precio elevado, de 3 euros por gramo, hacen que el plancton comestible sea todavía un poco exclusivo (el coste se debe al proceso de producción, muy laborioso debido a los protocolos de seguridad alimentaria y sostenibilidad que exigen las autoridades). La cantidad utilizada por plato suele ser de entre 0,1 y 0,5 gramos.

Los vientos del futuro soplan a favor del plancton y, sobre todo, de las microalgas. Ya en el informe de septiembre de 2015 *Alimentos sostenibles, seguros y nutritivos. Nuevas fuentes de nutrientes*, del Observatorio de la Innovación Empresarial de la Comisión Europea, se propusieron a las microalgas como fuente de complementos alimenticios para la producción de piensos de alto valor nutricional y colorantes. También se describían las microalgas como futuros alimentos sostenibles, seguros y nutritivos, resaltando la idoneidad de la espirulina y la clorela.

Las grandes cadenas de venta por Internet ya comercializan combinados de espirulina y clorela en cápsulas alimentarias. Me atrevo a pronosticar que en un futuro no muy lejano se venderán con aplicaciones gastronómicas tanto para restauración como para los hogares. IyC



SISMOLOGÍA

Terremotos en el cielo

Según una nueva y controvertida teoría, las mejores señales precursoras de un gran desastre podrían aparecer a 300 kilómetros sobre la superficie

Erik Vance

MARÍA CORTE

Erik Vance es escritor científico especializado en medioambiente y neurociencias.



El mediodía del viernes 11 de marzo de 2011, Kosuke Heki se encontraba en su despacho de la Universidad de Hokkaido, en el norte de Japón, cuando la tierra comenzó a temblar. Los pulsos estaban muy separados y duraban unos segundos. A Heki, geofísico que estudia un misterioso fenómeno relacionado con el extraño comportamiento de los electrones en el cielo después de un seísmo, le resultó interesante pero no se alarmó en exceso: parecía un gran terremoto, pero muy distante. Mientras continuaban los temblores, pensó que quizá podría usar los datos del evento en su investigación. Entonces alguien puso las noticias y la curiosidad de Heki se transformó en horror.

Las sacudidas correspondían al mayor seísmo de la historia reciente de Japón: el devastador terremoto de magnitud 9,0 que asoló la región de Tohoku, le costó al país cientos de miles de millones de dólares y se cobró más de 15.000 vidas. El tsunami que siguió al terremoto dañó la central nuclear de Fukushima Daiichi y provocó el mayor desastre nuclear de los últimos veinticinco años.

Mientras en otra parte del país los equipos de emergencia evacuaban a la población y salvaban vidas, Heki esperaba a que se restableciera el intermitente servicio de telefonía e Internet. El domingo, cuando Internet funcionó de nuevo, descargó algunas observaciones por satélite de la atmósfera situada sobre Tohoku y las revisó. Como se imaginaba, los electrones de la ionosfera mostraban una perturbación 10 minutos después del terremoto. Pero su modelo no podía explicar los datos analizando solo los minutos posteriores al temblor, así que probó a ampliar la ventana temporal, incluyendo también la hora anterior. Fue entonces cuando vio algo que lo dejó paralizado.

Cuarenta minutos antes del terremoto se había producido un ligero incremento de la densidad electrónica sobre el epicentro. Tal vez se tratara de una anomalía, un hecho aislado o un error de los instrumentos. O puede que hubiera algo más. Los científicos aún no han encontrado un precursor sísmico fiable, un signo revelador que pudiera alertar de la llegada de un gran terremoto. Si las alteraciones electrónicas constituyeran esa señal de aviso, podrían salvar miles de vidas al año.

Heki, a quien sus colaboradores describen como una persona humilde, calmada y prudente, desconfiaba de sus propios datos, así que analizó los de otros dos terremotos. Al observar de nuevo el cambio en la densidad electrónica, decidió seguir investigando. Hasta la fecha ha detectado esa variación antes de 18 grandes terremotos, y a lo largo de los últimos siete años se ha convencido de que es real.

Otros expertos están comenzando a examinar la idea más a fondo. «Hace años la gente no creía que pudiéramos predecir el tiempo y ahora lo hacemos», señala Yuhe Song, especialista en teledetección del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA. «Es probable que podamos ver algún efecto antes de sentir el temblor en la tierra. Ahí está ocurriendo algo... Creo que vale la pena discutirlo.»

Pero no todos coinciden. Muchos científicos ven el trabajo de Heki como la última de una larga retahíla de falsas promesas de predicción sísmica. «Estas cosas son como el resfriado: siempre andan por ahí», comenta el sismólogo Robert J. Geller, profesor emérito de la Universidad de Tokio que lleva años desacreditando distintas ideas para predecir terremotos. «Si las ignoras, desaparecen.»

Sin embargo, la idea de Heki sigue aquí y podría estar afianzándose. La señal electrónica ha aparecido en terremotos de magnitud media y también en los más intensos. Otros científicos han propuesto una teoría que vincula las fallas de la corteza terrestre con las alteraciones observadas en la atmósfera. Heki ha publicado sus hallazgos en revistas de prestigio, como *Geophysical Research Letters*, y lo han invitado a presentar sus resultados en el encuentro anual de la Unión Geofísica Americana. La pasada primavera, la Universidad de Chiba, en Japón, organizó un simposio dedicado a la predicción sísmica donde también se discutió su hipótesis. Si Heki está en lo cierto, su trabajo tendría enormes repercusiones en materia de seguridad ciudadana, pero el uso de un precursor así plantea algunos interrogantes. ¿Cuán preciso debería ser un sistema de alerta para poder dar la alarma y qué medidas de emergencia deberían adoptarse?

EN SÍNTESIS

En un solo terremoto pueden perder la vida decenas de miles de personas. Hace tiempo que los investigadores tratan de hallar un buen precursor sísmico que permita dar la alarma.

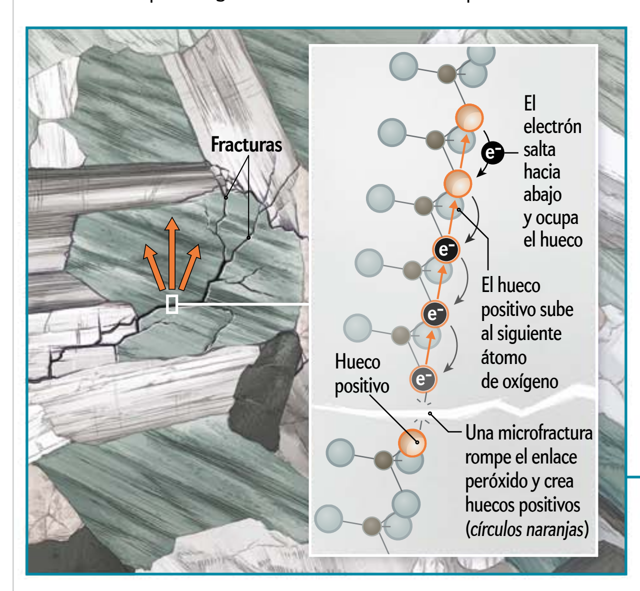
Nuevas observaciones indican que los electrones de la ionosfera se agrupan antes de un temblor, a veces con más de 30 minutos de antelación. Eso podría constituir una señal de alerta temprana.

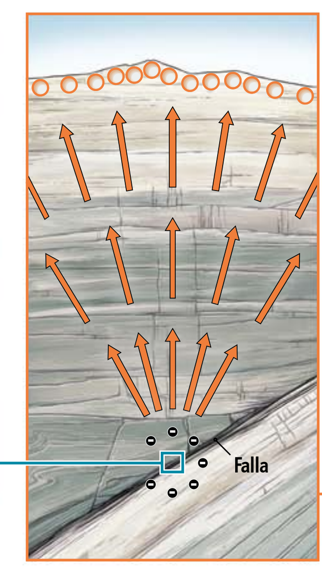
Anteriormente ya ha habido falsas promesas sobre métodos de predicción sísmica, así que algunos han recibido la idea con escepticismo. No obstante, los datos convencen cada vez a más científicos.

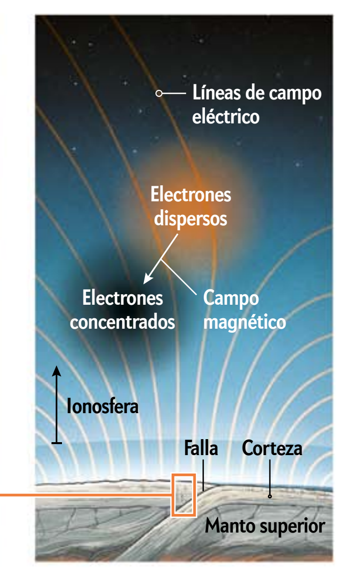
POSIBLE PRECURSOR SÍSMICO

Del suelo al cielo

Nuevas investigaciones indican que, una media hora antes de un gran terremoto, podrían producirse perturbaciones eléctricas a kilómetros de alttitud que podrían servir como alertas tempranas del desastre. Una teoría explica el mecanismo por el que la fractura de las rocas podría generar actividad en las capas altas de la atmósfera.







1. Inicio de la fractura
Algunas partes de la corteza terrestre se deslizan lentamente sobre otras. A veces sufren una brusca sacudida a lo largo de una falla y la tensión del movimiento comienza a desgarrar la roca, creando pequeñas fisuras o microfracturas.

2. Salto de electrones
Las microfracturas ejercen suficiente fuerza para romper los enlaces peróxido que mantienen unidos los átomos de oxígeno en las moléculas de los granos de roca. Esa fuerza hace que los electrones (cargados negativamente) contenidos en los granos se muevan y dejen atrás espacios de carga positiva, denominados «huecos». A medida que se desplazan más electrones, los huecos se mueven en sentido opuesto y se genera una pequeña corriente eléctrica en el grano de roca.

3. Ascenso a la superficie
El proceso continúa en los granos de roca contiguos por efecto dominó. El desplazamiento de los electrones permite que los huecos y su carga positiva se propaguen hacia arriba desde la fractura original, saltando de grano en grano hasta alcanzar la superficie. Mientras, aumenta la tensión creada por las rocas que se deslizan.

4. En la atmósfera
Cuando los huecos positivos se acumulan en la superficie pueden atraer electrones de las moléculas circundantes y generar un campo electromagnético, cuyas líneas pueden alcanzar altitudes kilométricas y alterar la distribución de los electrones de la ionosfera, concentrándolos en unas regiones y dispersándolos en otras. Los satélites pueden detectar tales anomalías.

MATTHEW TWOMBLY

PREDECIR LO PEOR

Cuentan que Charles F. Richter (creador de la escala de magnitud sísmica que lleva su nombre) opinaba que «solo los tontos y los charlatanes predicen terremotos». Pero eso no ha hecho que la gente deje de intentarlo. Parece que en el año 373 a.C. los animales corrieron en busca de refugio unos días antes de que un temblor de una magnitud estimada entre 6,0 y 6,7 destruyera la ciudad griega de Hélice. Antiguamente, los japoneses pensaban que los movimientos bruscos de los siluros presagiaban un terremoto. También se ha dicho que los perros, las ovejas, los ciempiés, las vacas lecheras y el argos real (un faisán de Sumatra) alteran su comportamiento antes de un seísmo.

Otros han considerado como posibles precursores los pozos que se secan repentinamente, las variaciones de temperatura, las emisiones de gas radón y, obviamente, la sucesión de seísmos precedentes más débiles. En 1975, combinando estas señales (incluido el comportamiento animal), los chinos lograron predecir un terremoto de intensidad 7,3 con suficiente antelación como para empezar a evacuar la ciudad de Haicheng. Eso generó muchas expectativas. «En los años setenta, los sismólogos estadounidenses y japoneses éramos bastante optimistas respecto a la predicción sísmica a corto plazo», apunta Masao Nakatani, experto en mecánica de rocas de la Universidad de Tokio. «Tendíamos a pensar que los terremotos debían ser predecibles.» Para la década de los ochenta, tanto EE.UU. como Japón habían creado grupos de investigación para acometer el reto.

Sin embargo, las señales fiables se mostraban esquivas. Un año después del éxito de China, la misma técnica no logró predecir un terremoto aún mayor que causó cientos de miles de víctimas. Japón, situado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, una región tectónicamente inestable, invirtió grandes esfuerzos para acabar concluyendo que un precursor podía funcionar una vez y no volver a hacerlo: la naturaleza parecía cambiar continuamente las reglas. Estados Unidos abandonó sus intentos a finales de los noventa, tras haber pronosticado un terremoto (a partir de observaciones de seísmos anteriores) que no llegó a producirse en Parkfield, California (finalmente ocurrió en 2004, pero sin haber mostrado ninguna de las señales esperadas).

El año del terremoto de Tohoku, una comisión internacional sobre predicción sísmica creada por el Gobierno italiano dio por cerrado ese campo. «Pese a las continuas labores de investigación realizadas en Japón, apenas se han hallado indicios de precursores que anuncien la inminencia de grandes terremotos», escribieron los miembros en mayo de 2011.

Pero cuatro meses después, Heki volvió a reabrirlo. Lo que observó fueron unas extrañas agrupaciones de partículas ionizadas, pero no en la superficie terrestre, sino a 300 kilómetros de altitud. La idea de una posible conexión entre la tierra y el cielo no tenía nada de extraordinario. En los años setenta, los científicos descubrieron que una roca sometida a presión genera una corriente eléctrica, como si fuera una batería muy débil. Según la teoría, eso ocurre porque sus átomos de oxígeno liberan electrones y dejan unos déficits que los físicos describen como huecos positivos. Los electrones de los átomos cercanos se mueven para ocupar esos huecos y al hacerlo crean otros nuevos, dando lugar a una cadena de cargas en movimiento.



LOS ESTRAGOS DE UN TERREMOTO: Casi sin previo aviso, el terremoto de Tohoku y posterior tsunami destruyeron la ciudad japonesa de Rikuzentakata; en la imagen, algunos lugareños caminan entre las ruinas.

NICOLAS ASFOURI, GETTY IMAGES

Los huecos «pueden recorrer grandes distancias: kilómetros, decenas de kilómetros, cientos de kilómetros», afirma Friedemann Freund, el investigador de la NASA y el Instituto SETI que descubrió el fenómeno. «Es como un cubo de agua que pasa de una persona a otra en un incendio.»

Freund explica que los huecos se propagan por la roca hasta alcanzar la superficie terrestre, donde atraen a los electrones de las moléculas del aire, como un imán que atrae virutas de hierro. Las cargas eléctricas viajan así a la atmósfera superior. Aunque —dadas las dificultades para observarlo directamente— este mecanismo es puramente teórico, parece cuadrar con las aparentes agrupaciones de electrones que se observan tras un terremoto. Sin embargo, nadie había identificado claramente el fenómeno antes de un seísmo.

Heki introdujo un nuevo método basado en redes de satélites GPS, las cuales pueden detectar leves cambios en la densidad electrónica de la atmósfera gracias a la desviación que sufren las señales de radio. Japón cuenta con una red de receptores GPS especialmente densa. Eso le permitió distinguir un pequeño aumento de electrones a gran altitud sobre el epicentro del terremoto de Tohoku unos 40 minutos antes de que los sismómetros de la superficie detectaran movimiento alguno. El geofísico confiesa que era reticente a presentar sus hallazgos. «Tenía que pensar muy bien cómo publicarlos», explica. «La predicción sísmica es especial. Despierta grandes pasiones.»

Después del seísmo de Tohoku, Heki analizó otros dos grandes terremotos anteriores para los que existían datos detallados de GPS, y en ambos halló un aumento de la concentración electrónica más de 30 minutos antes del evento. Aparentemente, cuanto más fuerte era el temblor, mayor era el tiempo de antelación: en un terremoto de magnitud 8,2 acaecido en Chile, el margen fue de 25 minutos, mientras que en el de Tohoku, de magnitud 9,0, fue de 40 minutos. Así que las señales no solo indicaban el inminente movimiento de las fallas, sino también la intensidad relativa del consiguiente temblor. «Nunca he visto un fenómeno tan claro justo antes de un terremoto», apunta.

DEBATE CAÓTICO

Heki finalmente publicó sus resultados en septiembre de 2011. Algunos científicos no tardaron en señalar problemas: afirmaban que el efecto respondía a una interpretación errónea de los datos y que las perturbaciones observadas durante y después del terremoto enturbiaban el análisis. En respuesta, Heki empleó otro método analítico para poner de relieve los sucesos previos a los terremotos. Además, convirtió las mediciones realizadas desde un cierto ángulo a una «vista aérea» vertical, pensando que eso facilitaría la identificación del fenómeno. Pero los críticos replicaron que no había hecho más que reorganizar los mismos datos dudosos. Otro equipo japonés vinculó el efecto a las tormentas geomagnéticas. Heki llevó a cabo otro estudio teniendo en cuenta ese factor, pero no observó que explicara todas las alteraciones detectadas.

Pronto algunos escépticos comenzaron a comulgar con sus ideas. «Este es, con diferencia, el mejor precursor que se ha propuesto», dice Nakatani, que había dejado de creer en la predicción sísmica tras los fracasos de los años noventa. Pero Heki ha hecho que recupere la fe, hasta el punto de afirmar que podríamos estar ante «el descubrimiento más importante de la historia de la sismología». Song se muestra menos hiperbólico, pero coincide en que las nubes de electrones parecen reflejar un fenómeno real y es difícil atribuirlas a errores. Según Freund, el evento de Tohoku se produjo tras varios meses de aumentos de presión y variaciones en la densidad electrónica. Y aunque esa presión podría haber encontrado otras vías de escape, como los invisibles terremotos «silenciosos» [*véase* «La Tierra tiembla en silencio» por Peter Cervelli; Investigación y Ciencia, mayo de 2004], la liberación de partículas cargadas no deja de ser un fenómeno predecible que, en teoría, podría detectarse en otros terremotos.

Sin embargo, los críticos insisten en que Heki está viendo en su ordenador cosas que no existen en el mundo real. «Trata de confirmar su idea inicial sin aportar pruebas válidas», señala Fabrizio Masci, del Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología de Italia. Masci ha publicado artículos que refutan no solo

la teoría de Heki, sino también otras propuestas de predicción sísmica, y afirma que las respuestas de Heki son «una manera hábil de distraer al lector». Muchas de las críticas se centran en el modo en que Heki determina los valores de referencia de las concentraciones electrónicas. Las diminutas partículas se extienden por todo el planeta y fluctúan tanto como las condiciones meteorológicas. Pero, según Heki, los electrones se agrupan un poco más de lo habitual justo antes de un terremoto. Los críticos sostienen que ese cambio responde a las fluctuaciones diarias de los electrones. Dicho de otra manera: Heki estaría persiguiendo un fantasma estadístico.

Masci va más allá y razona que, si la naturaleza de los terremotos es caótica, podría no existir ningún precursor sísmico. Si no pueden determinarse con precisión las condiciones iniciales de un evento, es imposible saber qué efectos se producirán. Y en el caso de los terremotos es extremadamente difícil determinar todas las condiciones iniciales.

Giovanni Occhipinti, del Instituto de Física del Globo de París, no es tan pesimista, aunque coincide en la enorme dificultad que entraña comprender todos los factores implicados (el tipo de roca, la presión, las fallas cercanas) lo suficientemente bien como para realizar una predicción. Al igual que Heki, Occhipinti estudia cómo afectan los terremotos a los iones atmosféricos. El experto apunta que dichos iones se comportan de manera tan caótica que no es posible distinguir ninguna señal entre el ruido. Es como tratar de predecir un huracán el día anterior a partir de una única nube. «El problema es que hay un montón de nubes en constante movimiento», explica. «No es fácil encontrar la manera de distinguir esa nube concreta que queremos ver como precursor.»

Hasta hace poco, Occhipinti se posicionaba en el frente escéptico y consideraba que el hallazgo de Heki era una mera anomalía estadística. Sin embargo, el último trabajo de Heki, que tiene en cuenta el complejo espacio tridimensional donde se produce el fenómeno, despertó su interés. En vez de una instantánea tomada por satélite, los modelos en 3D muestran efectos multidimensionales que apuntan a la existencia de un proceso físico tras las alteraciones, por lo que resulta difícil descartarlas como espurias. A Occhipinti le gustaría ver más análisis tridimensionales y comparar los resultados con otros modelos para comprobar hasta qué punto encajan. Así que aún no está completamente convencido, pero sí considera que es una idea «interesante» y la está examinando más de cerca. «Está impulsando la ciencia», señala Occhipinti, pero «hay que ser muy, muy, muy precisos. Estamos jugando con la vida de la gente».

DAR LA ALARMA

Y podríamos estar hablando de cientos de miles de vidas. El Servicio de Inspección Geológica de EE.UU. realizó un estudio sobre las víctimas de terremotos en todo el mundo durante un período de 16 años desde el año 2000. Las cifras de fallecidos fluctúan debido a que no se producen grandes terremotos cada año, pero son escalofriantes: en siete de esos años se produjeron más de 20.000 muertes, y en dos de ellos se superaron las 200.000. En los países más afectados, disponer de cualquier tipo de aviso —aunque sea con pocos segundos de antelación— es una necesidad acuciante. Un ejemplo es Ciudad de México, una de las zonas sísmicas más letales y mejor estudiadas del planeta. Tras un devastador terremoto que se cobró hasta 10.000 vidas en 1985, el Gobierno aprovechó que en esa región las ondas sísmicas recorren distancias inusualmente grandes para habilitar un sistema de vigilancia que puede alertar a la gente con dos minutos de antelación si detecta las ondas lo bastante lejos.

Carlos Valdés, ingeniero geofísico y director del Centro Nacional de Prevención de Desastres de México, advierte de que, aunque la idea de un aviso con 40 minutos de margen pueda sonar bien, la realidad no es tan sencilla. En primer lugar, las falsas alarmas pueden desbaratar cualquier respuesta de emergencia. Por ejemplo, en México se dispararon las alarmas con algunos terremotos que luego no tuvieron la intensidad suficiente o que no se produjeron en un lugar que sacudiese la ciudad. Cansada, la población dejó de responder a las alertas. Pero a Valdés le preocupa más el problema opuesto: el pánico. «Alguien dirá "tengo 40 minutos, me voy de la ciudad"», comenta. «Basta con que una sola persona comience a gritar o se ponga a correr para que todos la imiten.» Entonces las carreteras se colapsan y nadie logra ponerse a salvo.

Con todo, otros expertos en planes de emergencia señalan que disponer de un margen de tiempo, por breve que sea, ofrece la oportunidad de cerrar gasoductos o detener el metro, reduciendo así los riesgos. Y una mayor precisión resolvería el problema de las falsas alarmas. Científicos británicos y rusos han propuesto lanzar un satélite que realice un seguimiento más detallado de las anomalías atmosféricas como las que estudia Heki, mientras China prepara un programa espacial de predicción basado en las alteraciones electromagnéticas de la ionosfera. Pero, debido a la complejidad intrínseca de la ionosfera y a la confusa naturaleza de los terremotos, podrían pasar décadas hasta que los datos se traduzcan en alertas.

Geller cree que ese día no llegará nunca. «Los que han buscado precursores sísmicos en los últimos 130 años han asumido ingenuamente, primero, que existen, y segundo, que serán más intensos cuanto más fuerte sea el terremoto que anuncian. Pero eso no tiene por qué ser así», sostiene.

Pese a todo, Heki sigue haciendo progresos. Recientemente ha publicado un detallado análisis tridimensional del precursor de un terremoto ocurrido en Chile en 2015, que podría hacer que resulte más difícil rebatir sus ideas. También trata de completar algunas lagunas en los datos para conectar las propiedades de las cargas eléctricas con los lugares donde se producen los terremotos. El objetivo es entender mejor qué ocurre en la corteza para que se produzcan los efectos observados en la atmósfera. «Algo sucede en la ionosfera antes de un terremoto. Desconozco el mecanismo físico», concluye Heki, «pero las observaciones son muy claras».

PARA SABER MÁS

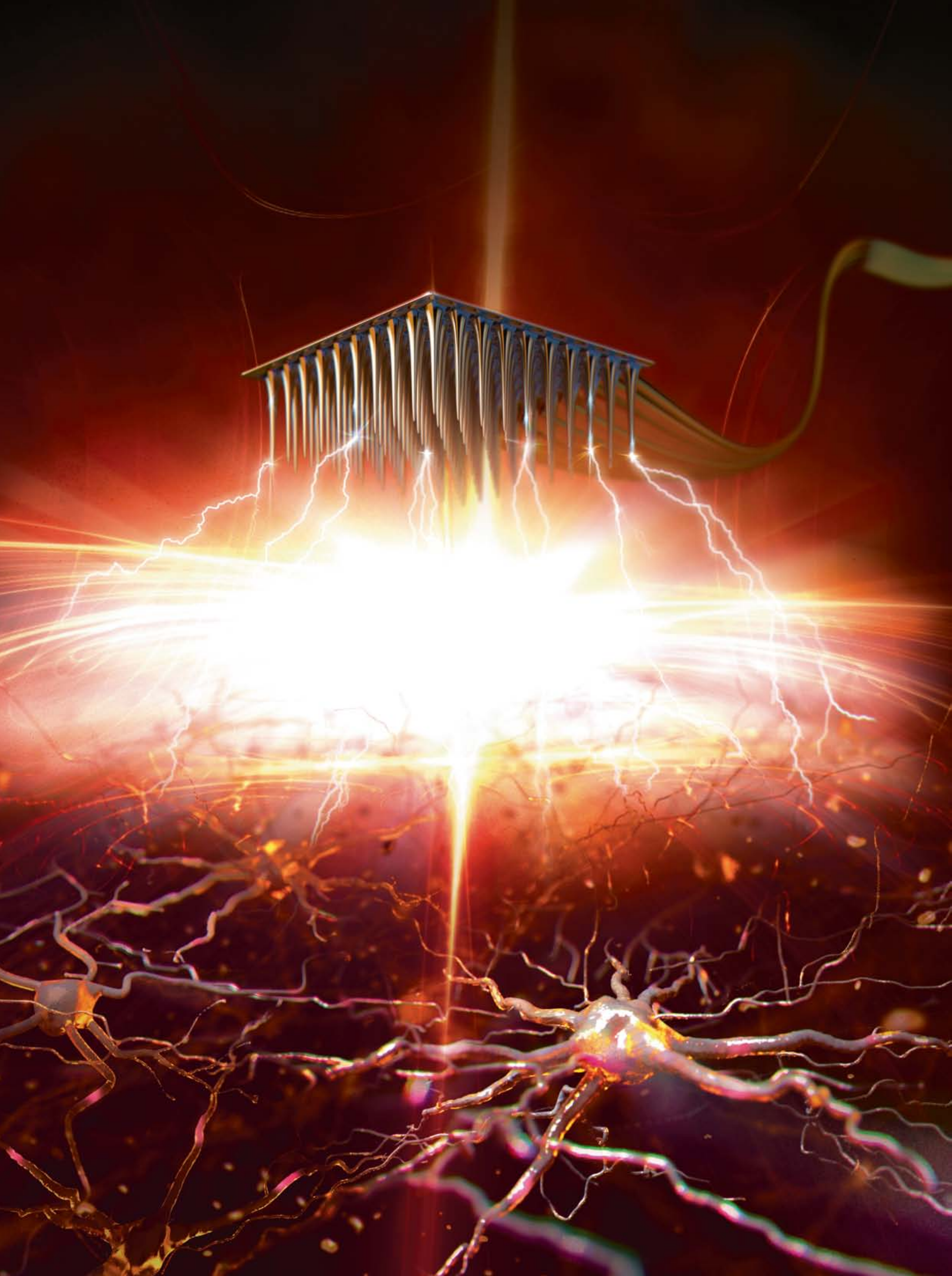
Apparent ionospheric total electron content variations prior to major earthquakes due to electric fields created by tectonic stresses. Michael C. Kelley *et al.* en *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 22, n.º 6, págs. 6689-6695, junio de 2017.

Ionospheric anomalies immediately before M_w7.0–8.0 earthquakes. Liming He y Kosuke Heki en *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 122, n.º 8, págs. 8659-8678, agosto de 2017.

Three-dimensional tomography of ionospheric anomalies immediately before the 2015 Illapel earthquake, Central Chile. Liming He y Kosuke Heki en *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 123, n.º 5, págs. 4015-4025, mayo de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Segundos antes del gran temblor. Richard Allen en *IyC*, junio de 2011.



NEUROTECNOLOGÍA

LA MÁQUINA QUE LEE LAS INTENCIONES

Una nueva generación de interfaces neuronales puede deducir lo que una persona quiere

Richard Andersen

Ilustración de Mark Ross

Richard Andersen es profesor J. G. Boswell de neurociencia y director del Centro de Interfaz Cerebro-Máquina del Instituto de Neurociencia Tianqiao y Chrissy Chen del Instituto de Tecnología de California. Estudia los mecanismos neuronales de la vista, el oído, el equilibrio, el tacto y la acción, y el desarrollo de prótesis neuronales. Andersen es miembro de la Academia Nacional de Ciencias y la Academia Nacional de Medicina de EE.UU.





E ME PONE LA PIEL DE GALLINA CADA VEZ QUE LO VEO: UN VOLUNTARIO paralítico sentado en una silla de ruedas controla un ordenador o una extremidad robótica solo con sus pensamientos. Es la demostración de una interfaz cerebro-máquina (ICM) en acción.

Ese logro ocurrió en mi laboratorio en 2013, cuando Erik Sorto, herido de bala cuando tenía 21 años, se valió tan solo de sus pensamientos para beber una cerveza sin ayuda de nadie por primera vez desde hacía más de diez años. La interfaz envió un mensaje neural desde un área cortical de alto nivel, y un apéndice electromecánico cogió una botella y la llevó a los labios de Sorto para que pudiera tomar un sorbo. Había transcurrido más de un año desde que se le implantaron en el cerebro unos electrodos que controlan las señales neurales de los pensamientos que dan lugar a las acciones motoras. Junto con mis colaboradores observamos con asombro cómo completaba esta tarea engañosamente simple que, en realidad, es de una intrincada complejidad.

Al presenciar semejante hazaña, de inmediato surge la cuestión de cómo puede controlarse una prótesis mecánica solo con el pensamiento. A diario movemos las extremidades sin pensar, acciones que cualquier ICM compleja debería llevar a cabo sin dificultad. Sin embargo, durante décadas los neurocientíficos han intentado descodificar las señales neuronales que inician los movimientos para alargar el brazo y asir un objeto. El escaso éxito en la identificación de dichas señales ha espoleado la búsqueda de nuevos métodos para interpretar la cacofonía de la actividad eléctrica que resuena mientras los 86.000 millones de neuronas del cerebro se comunican entre sí. Ahora, una nueva generación de interfaces alimenta la esperanza de crear una unión perfecta entre cerebro y prótesis al intervenir con gran precisión en las regiones neuronales que formulan acciones, ya sea el objetivo asir una taza o dar un paso.

DEL CEREBRO AL ROBOT

Existen dos tipos principales de interfaces: unas envían mensajes al cerebro (ICM de «escritura») y las otras los reciben (ICM de «lectura»). Las primeras suelen emplear la estimulación eléctrica para transmitir una señal al tejido neural y ya se utilizan con éxito en diversas aplicaciones clínicas: las prótesis cocleares estimulan el nervio auditivo y permiten que los sujetos sordos oigan; con la estimulación cerebral profunda de los ganglios basales, un área que controla la actividad motora, se tratan trastornos como la enfermedad de Parkinson y el temblor hereditario; también están realizándose ensayos clínicos para aliviar ciertas formas de ceguera con dispositivos que estimulan la retina.

Las ICM de «lectura», por el contrario, registran la actividad neuronal, pero aún se encuentran en fase de desarrollo. Antes de que la próxima generación de esta tecnología llegue a los pacientes, han de abordarse los desafíos únicos que plantea la lectura de señales neuronales. No obstante, ya existen métodos algo menos refinados. El electroencefalograma (EEG) registra la actividad promedio de una sección de varios centímetros de tejido cerebral, que contiene millones de células, aunque no capta la actividad de las distintas neuronas de un circuito. Por otra parte, la resonancia magnética funcional (RMf) es una técnica indirecta que mide el aumento del flujo sanguíneo en una región que está activa. Permite generar imágenes de áreas más reducidas que el EEG, pero su resolución continúa siendo baja. Los cambios en el flujo sanguíneo se producen despacio, de modo que la resonancia magnética no puede distinguir variaciones rápidas de la actividad cerebral.

Para superar estas limitaciones, lo ideal sería registrar la actividad de las neuronas por separado. Observando la variación en la velocidad de descarga de un gran número de neuronas se obtendría la imagen más completa de lo que ocurre en una región específica del cerebro. En los últimos años, los implantes de matrices de electrodos han empezado a posibilitar este tipo de registro. Los dispositivos que se emplean en la actualidad son superficies planas de cuatro por cuatro milímetros que

EN SÍNTESIS

Las interfaces cerebro-máquina pueden enviar señales a circuitos neuronales y recibirlas.

Los dispositivos actuales tienden a funcionar de manera imprecisa o con lentitud.

Una nueva investigación implanta las interfaces en aquellas áreas del cerebro que formulan las intenciones de moverse de una persona, con lo que se consigue una técnica más versátil para los pacientes con lesiones medulares.

contienen hasta 100 electrodos. Cada uno de ellos mide entre 1 y 1,5 milímetros de largo. La matriz completa, que se asemeja a un lecho de clavos, puede registrar la actividad de entre 100 y 200 neuronas.

Las señales captadas por estos electrodos se procesan en «descodificadores» que utilizan algoritmos matemáticos para traducir los diversos patrones de descarga neuronal en una señal que inicia una acción concreta, como el control de una extremidad robótica o de un ordenador. Estas interfaces de lectura ayudarán a pacientes que han sufrido daños cerebrales a causa de lesiones de la médula espinal, ictus, esclerosis múltiple, esclerosis lateral amiotrófica y distrofia muscular de Duchenne.

Nuestro laboratorio se ha centrado en sujetos tetrapléjicos, que sufren parálisis en las extremidades superiores e inferiores debido a lesiones en la región cervical de la médula espinal. Registramos la actividad de la corteza, la capa de unos tres milímetros de grosor que cubre los dos hemisferios del cerebro. Si se extendiera, la corteza de cada hemisferio mediría unos 80.000 milímetros cuadrados. El número de regiones corticales especializadas en controlar funciones cerebrales específicas ha aumentado conforme se han recabado más datos y, en la actualidad, se calcula que comprende más de 180 áreas. Estas ubicaciones procesan la información sensorial, se comunican con otras regiones del cerebro involucradas en la cognición, toman decisiones o envían órdenes para desencadenar una acción.

En resumen, una interfaz cerebro-máquina puede interactuar con muchas regiones de la corteza . Entre ellas figuran las áreas corticales primarias, que detectan los estímulos sensoriales, como el ángulo y la intensidad de la luz que incide en la retina o las sensaciones desencadenadas en una terminación nerviosa. También se apunta a las cortezas de asociación, densamente conectadas, entre las áreas primarias que están especializadas en el lenguaje, el reconocimiento de objetos, las emociones y el control ejecutivo de la toma de decisiones.

Diversos grupos han empezado a registrar poblaciones de neuronas individuales en pacientes paralíticos, lo que les permite manejar una prótesis en el entorno controlado de un laboratorio. Aún persisten obstáculos importantes que deben salvarse antes de que pueda equiparse a un paciente con un dispositivo protésico neuronal con la misma facilidad que un marcapasos. Mi grupo aspira a registrar la actividad de las áreas asociativas, y no de la corteza motora, que es el objetivo de otros laboratorios. Con ello, confiamos en poder conseguir una mayor velocidad y versatilidad a la hora de detectar el inicio de las señales neuronales que transmiten las intenciones de un paciente.

El área de asociación concreta que mi laboratorio ha estudiado es la corteza parietal posterior (CPP), donde se planifica la ejecución de una acción. En nuestro trabajo con primates no humanos, hallamos una subregión de la CPP, llamada corteza intraparietal lateral, que discierne las intenciones para iniciar el movimiento de los ojos. Otras zonas de la CPP se encargan de procesar el movimiento de las extremidades, y la región parietal del alcance prepara el de los brazos. Además, Hideo Sakata, por entonces en la Facultad de Medicina de la Universidad de Nihon, y sus colaboradores hallaron que el área intraparietal anterior formula los movimientos de agarre.

La CPP ofrece varias ventajas para el control cerebral de un artefacto robótico o del cursor de un ordenador. Una de ellas es que controla ambos brazos, mientras que la corteza motora de cada hemisferio, el área en la que se centran otros laboratorios, activa la extremidad del lado opuesto del cuerpo. La CPP también indica el objetivo de un movimiento. Por ejemplo, cuando a un primate no humano se le induce visualmente a alcanzar un objeto, esta área del cerebro se activa enseguida, marcando la localización de un objeto deseado. Por el contrario, la corteza motora envía una señal para coordinar la trayectoria del movimiento. Conocer la finalidad de una acción motora prevista permite que la interfaz cerebro-máquina la descodifique rápidamente, en unos pocos cientos de milisegundos, mientras que para calcular la señal de trayectoria procedente de la corteza motora se puede tardar más de un segundo.


LA INTERFAZ desarrollada por Richard Andersen (*izquierda*), del Instituto de Tecnología de California, y su equipo permitió a Erik Sorto (*derecha*) mover un brazo robótico.

LANCE HAYASHIDA E INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE CALIFORNIA

DEL LABORATORIO AL PACIENTE

No ha resultado fácil pasar de los experimentos con animales en el laboratorio a los estudios de la CPP en humanos. Transcurrieron quince años antes de poder realizar el primer implante. Primero, insertamos en primates sanos las mismas matrices de electrodos que planeábamos usar en humanos. Los monos aprendieron entonces a controlar cursores de ordenador o extremidades robóticas.

Formamos un equipo de científicos, médicos y profesionales de rehabilitación del Instituto de Tecnología de California (Caltech), la Universidad del Sur de California, la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA), el Centro Nacional de Rehabilitación

Rancho Los Amigos y el Hospital y Centros de Salud Casa Colina. El equipo recibió el visto bueno de la Agencia de Fármacos y Alimentos y de los comités institucionales encargados de evaluar la seguridad y la ética del procedimiento en los laboratorios, hospitales y clínicas de rehabilitación involucrados.

Los voluntarios en este tipo de proyectos son verdaderos pioneros, que pueden o no obtener un beneficio. En última instancia, participan para ayudar a aquellos usuarios que recurrirán a esta tecnología una vez que esté perfeccionada y lista para su uso cotidiano. En abril de 2013, Erik Sorto, nuestro primer voluntario, se sometió a la cirugía de implante, que llevaron a cabo los neurocirujanos Charles Liu y Brian Lee. La operación salió a la perfección, pero luego siguió un período de espera, mientras el paciente se recuperaba, antes de poder probar el dispositivo.

Mis colegas del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, que construyeron y lanzaron los robots exploradores de Marte, hablan de los siete minutos de terror que transcurren desde el momento en que el vehículo entra en la atmósfera del planeta hasta que aterriza. Para mí fueron dos semanas de inquietud, durante las que me preguntaba si el implante funcionaría. Sabíamos cómo operaban áreas similares del cerebro de primates, pero un implante humano navegaría en aguas inexploradas. Nadie antes había intentado registrar la actividad de una población de neuronas de la CPP.

Durante el primer día de pruebas detectamos actividad neural y, al final de la semana, disponíamos de señales de suficientes neuronas para empezar a determinar si Sorto podría controlar una extremidad robótica. Se producía una variación en la actividad de algunas neuronas cuando Sorto imaginaba que movía su propio brazo. La primera tarea consistió en orientar la mano del robot en diferentes direcciones para estrechársela a un estudiante de posgrado. Estaba entusiasmado, como nosotros, porque era la primera vez desde su lesión que interactuaba con el mundo usando el movimiento corporal de un brazo robótico.

A menudo la gente quiere saber cuánto tiempo se tarda en aprender a utilizar una interfaz cerebro-máquina. De hecho, la técnica funcionó desde el primer momento. Resultó fácil e intuitivo usar las señales de intención del cerebro para controlar el brazo robótico. Al imaginar diferentes acciones, Sorto observaba los registros de neuronas de su corteza y podía activarlas y desactivarlas a voluntad.

Al principio de un estudio, preguntamos a los participantes qué les gustaría conseguir si pudieran controlar un robot. Sorto quería ser capaz de tomar una cerveza por sí mismo sin tener que pedirle ayuda a nadie. Logró dominar esta acción aproximadamente un año después de empezar el estudio. Con el equipo codirigido por Spencer Kellis, de Caltech, que incluía a expertos en robótica del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins, fusionamos las señales de intención de Sorto con la potencia de procesamiento suministrada por la visión artificial y la robótica inteligente.

El sistema de visión artificial analiza las imágenes de las cámaras de vídeo, y el robot inteligente combina la señal de intención con algoritmos informáticos para iniciar el movimiento del brazo del robot. Sorto logró el objetivo después de un año, entre vítores y gritos de alegría de todos los presentes. En 2015 publicamos en *Science* nuestros primeros resultados sobre el uso de las señales de intención de la CPP para controlar prótesis neuronales.

Sorto no es el único usuario de nuestra técnica. Nancy Smith, que lleva cuatro años participando en el ensayo, se quedó tetrapléjica tras un accidente de tráfico hace unos diez años. Era

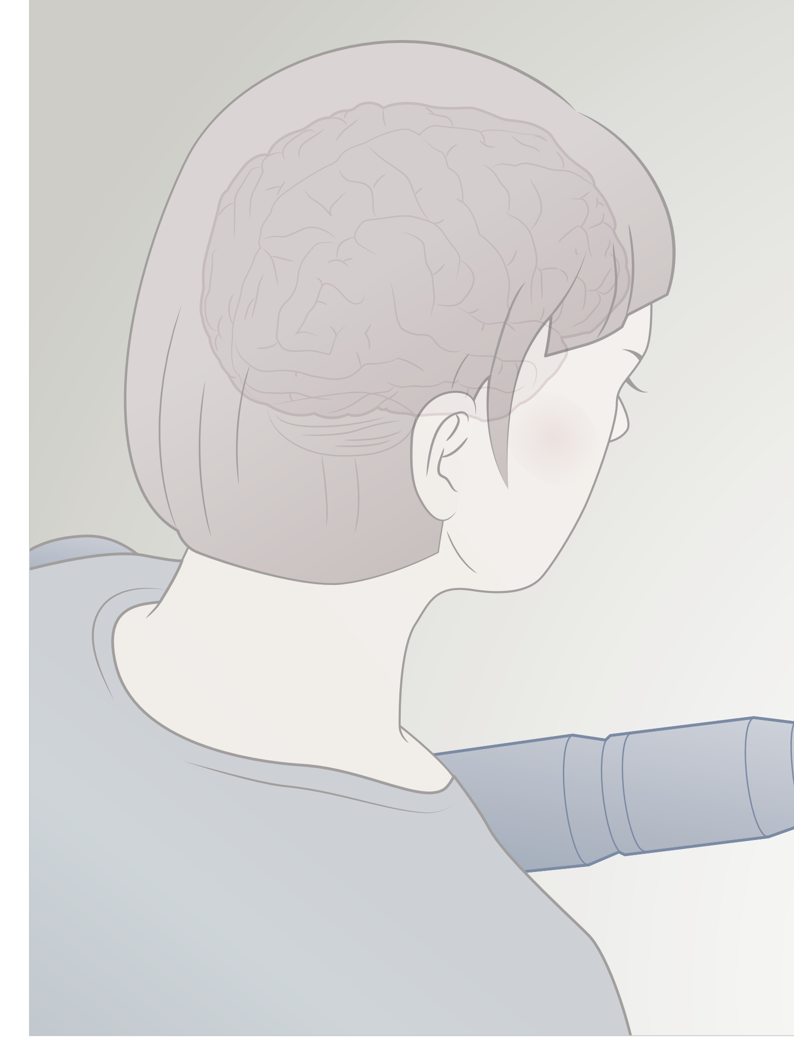
ASÍ FUNCIONA UNA ICM

Basta con pensarlo

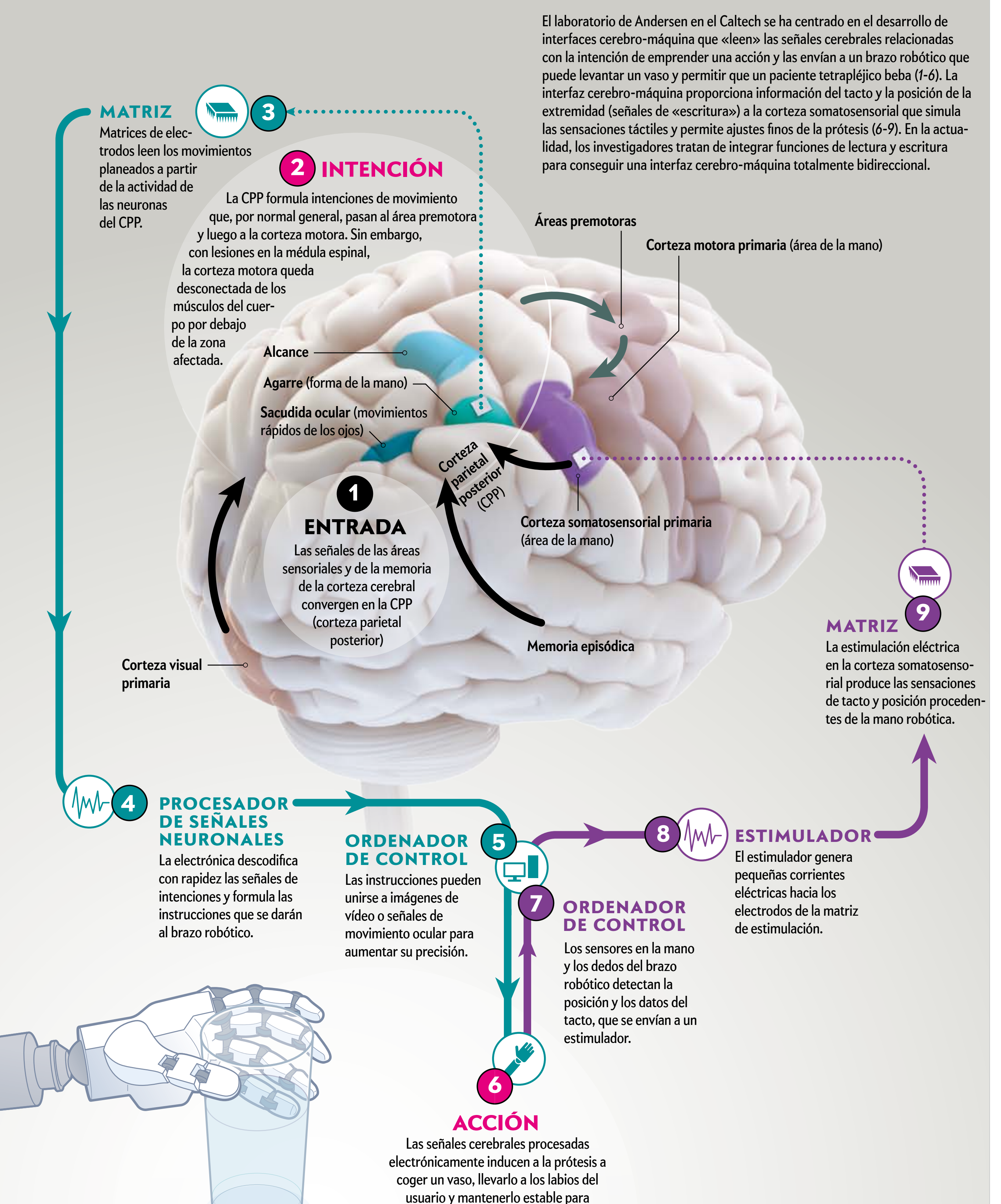
Durante 15 años, los neurocientíficos han construido interfaces cerebro-máquina (ICM) que permiten mover cursores de ordenador o manejar prótesis por medio de señales neuronales. La tecnología ha avanzado con lentitud debido a que traducir las descargas eléctricas de las neuronas en órdenes para jugar a un videojuego o mover un brazo robótico es un proceso sumamente intrincado.

Un grupo del Instituto de Tecnología de California (Caltech) ha efectuado progresos en el campo neuroprotésico recurriendo al procesamiento neuronal de alto nivel —la intención de iniciar una acción—, seguido de la transmisión de las señales eléctricas relevantes a un brazo robótico. En vez de enviar señales desde la corteza motora para mover una extremidad, como han intentado otros laboratorios, los investigadores del Caltech colocan electrodos en la corteza parietal posterior (CPP), que transfiere a una prótesis la intención de actuar del cerebro.

Descodificar señales neuronales sigue planteando todo un desafío para los neurocientíficos. Sin embargo, el uso de señales procedentes de la CPP, la cúpula de la cadena de mando cognitiva, parece que derivará en un control más rápido y versátil de las prótesis.



El laboratorio de Andersen en el Caltech se ha centrado en el desarrollo de interfaces cerebro-máquina que «leen» las señales cerebrales relacionadas con la intención de emprender una acción y las envían a un brazo robótico que puede levantar un vaso y permitir que un paciente tetrapléjico beba (*1-6*). La interfaz cerebro-máquina proporciona información del tacto y la posición de la extremidad (señales de «escritura») a la corteza somatosensorial que simula las sensaciones táctiles y permite ajustes finos de la prótesis (*6-9*). En la actualidad, los investigadores tratan de integrar funciones de lectura y escritura para conseguir una interfaz cerebro-máquina totalmente bidireccional.



AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

profesora de informática en un instituto de secundaria y tocaba el piano como pasatiempo. En estudios realizados con Tyson Aflalo, del Caltech, y Nader Pouratian, de la UCLA, descubrimos una representación detallada de las manos en la CPP de Smith. Mediante realidad virtual, la mujer podía imaginar que movía por separado los diez dedos de las manos izquierda y derecha de un avatar en la pantalla del ordenador. Con el movimiento imaginado de los cinco dedos de una mano, Smith podía tocar melodías sencillas en un teclado de piano generado por ordenador.

CÓMO REPRESENTA EL CEREBRO LOS OBJETIVOS

Nos entusiasmó trabajar con estos pacientes para encontrar neuronas sintonizadas para procesar las señales que se relacionan con las intenciones de una persona. La cantidad de información que se extrajo de unos pocos cientos de neuronas resultó abrumadora. Logramos descodificar un surtido diverso de actividades cognitivas, entre las que se incluían estrategias mentales (imaginar frente a intentar una acción), movimientos de dedos, decisiones de recordar estímulos visuales, posiciones de las manos para asir un objeto, acciones observadas, verbos de acción, como «agarrar» o «empujar», y cálculos matemáticos. Para nuestra sorpresa, la inserción de varias matrices de electrodos diminutos nos permitió descifrar gran parte de las intenciones de una persona.

La cuestión sobre cuánta información puede registrarse a partir de una pequeña sección de tejido cerebral me recordó un problema científico similar con el que me había topado al comienzo de mi carrera. Durante mi formación posdoctoral con el difunto Vernon Mountcastle, en la Escuela de Medicina Johns Hopkins, examinamos cómo se representa el espacio visual en la CPP de monos. Nuestros ojos son como cámaras, con retinas fotosensibles que señalizan la localización de los estímulos visuales (la imagen completa se denomina mapa retinotópico). Las neuronas responden a regiones concretas de la retina, conocidas como campos receptivos. Pero el procesamiento de la percepción visual difiere del de una cámara de vídeo. Cuando el aparato se mueve, la imagen grabada también se desplaza, pero cuando movemos los ojos, el mundo permanece estable. La imagen retinotópica ha de convertirse en una representación visual del espacio que tenga en cuenta hacia dónde se dirige la mirada, de modo que, cuando se muevan los ojos, el mundo no parezca deslizarse.

La CPP constituye un centro de procesamiento clave para la representación del espacio visual de alto nivel. Cuando se realiza el movimiento para echar mano a un objeto y levantarlo, el cerebro ha de tener en cuenta dónde miran los ojos. Las lesiones de la CPP en humanos producen un movimiento impreciso. En el laboratorio de Mountcastle, hallamos que las neuronas individuales de la CPP tenían campos receptivos que captaban partes de una escena. Además, las mismas células transportaban también información sobre la posición ocular. Las dos señales interactuaban al multiplicarse la respuesta visual por la posición de los ojos en la cabeza, producto que se denomina campo de ganancia.

La inserción de unas diminutas matrices de electrodos en el cerebro nos permitió descodificar muchas de las intenciones de una persona

Cuando me incorporé al Instituto Salk de Estudios Biológicos, muy próximo a la Universidad de California en San Diego (UCSD), continué investigando el problema de la representación del espacio en el cerebro. En colaboración con David Zipser, neurocientífico teórico de la UCSD dedicado al desarrollo de redes neuronales, publicamos en *Nature* un modelo computacional que combinaba posiciones retinotópicas con la dirección de la mirada para trazar mapas del espacio que permanecen invariables frente a los movimientos oculares. Durante el entrenamiento de las redes neuronales, sus capas intermedias desarrollaron campos de ganancia, tal como ocurrió en los experimentos de la CPP. Al mezclar señales de los estímulos visuales y de las posiciones oculares en las mismas neuronas, bastaban tan solo nueve células para representar el campo visual completo.

Recientemente, la idea de las representaciones mixtas (poblaciones de neuronas que responden a múltiples variables, como con los campos de ganancia) ha suscitado un renovado interés. Por ejemplo, los registros de la corteza prefrontal muestran una mezcla de dos tipos de tareas de memoria y diferentes objetos visuales.

Este trabajo, además, podría influir directamente en la explicación sobre lo que ocurre en la CPP. Lo descubrimos cuando le pedimos a Smith que, a partir de un conjunto de instrucciones escritas, realizara ocho combinaciones distintas de una tarea. Uno de sus cometidos requería definir una estrategia para imaginar o intentar una acción. En otro necesitaba usar el lado derecho e izquierdo del cuerpo; un tercero implicaba apretar una mano o encogerse de hombros. Hallamos que las neuronas de la CPP mezclaban todas estas variables, y que la amalgama exhibía un patrón específico, a diferencia de las interacciones aleatorias que nosotros y otros habíamos referido en experimentos con animales de laboratorio.

La actividad de las poblaciones de neuronas para elaborar estrategias y para controlar cada lado del cuerpo tiende a superponerse. Si una neurona se activa para iniciar el movimiento de la mano izquierda, lo más probable es que también responda a un intento de movimiento de la derecha, mientras que los grupos de neuronas que controlan el hombro y la mano se encuentran más distanciados. Nos referimos a este tipo de representación como selectividad parcialmente mixta. Desde entonces, hemos hallado similitudes en representaciones parcialmente mixtas que parecen componer una semántica del movimiento. La actividad de células sintonizadas para realizar el mismo tipo de acción tiende a superponerse. Una neurona que responda a vídeos que muestren a una persona asiendo un objeto también se activará cuando una persona lea la palabra «asir». Sin embargo, las células que responden a una acción como «empujar» tienden a escindirse en un grupo propio. En general, la codificación parcialmente mixta parece subyacer a los cálculos que son similares (los movimientos de la mano izquierda se asemejan a los de la derecha) y también separa aquellos que exhiben formas distintas de procesamiento neural (el movimiento del hombro difiere del movimiento de la mano).

Se ha encontrado codificación mixta y parcialmente mixta en ciertas partes de la corteza de asociación, por lo que sería

preciso explorar si aparecen también en otras ubicaciones que gobiernan el lenguaje, el reconocimiento de objetos y el control ejecutivo. Además, convendría saber si las regiones corticales motoras o sensoriales primarias utilizan estructuras similares, parcialmente mixtas.

Otra cuestión apremiante estriba en averiguar en qué grado el aprendizaje de nuevas tareas puede afectar al rendimiento de los voluntarios que usan las prótesis. Si se aprenden con facilidad, podría colocarse un implante en cualquier área del cerebro y entrenarse para desempeñar cualquier función concebible para la interfaz cerebro-máquina. Así, un implante en la corteza visual primaria podría aprender a controlar funciones no relacionadas con la visión. Pero, si el aprendizaje está más restringido, un implante en un área motora, por ejemplo, solo podría entrenarse para realizar acciones relacionadas con el movimiento. Los primeros resultados sugieren que los implantes deberían colocarse en áreas previamente identificadas que controlen actividades cognitivas específicas.

ESCRIBIR LAS SENSACIONES

Una interfaz cerebro-máquina no solo debe recibir y procesar señales cerebrales, sino que también ha de enviar información de la prótesis al cerebro. Cuando alargamos el brazo para coger un objeto, la retroalimentación visual nos ayuda a dirigir la mano, cuya situación dependerá de la forma del objeto. Si una vez que empieza a manipularlo, la mano no recibe las señales del tacto y de la posición de la extremidad, el rendimiento se reduce rápidamente.

Hallar el modo de corregir este déficit es de vital importancia para nuestros voluntarios con lesiones de la médula espinal, que sufren parálisis por debajo de la zona afectada. Tampoco perciben las sensaciones táctiles o la posición del cuerpo que son esenciales para un movimiento fluido. Por lo tanto, una prótesis neuronal ideal debe compensarlo mediante una señalización bidireccional: debe transmitir las intenciones del voluntario, pero también detectar la información relacionada con el tacto y la posición que procede de los sensores de una extremidad robótica.

Robert Gaunt y sus colaboradores de la Universidad de Pittsburgh han abordado este problema implantando matrices de microelectrodos en la corteza somatosensorial de una persona tetrapléjica, donde se procesa la información sensorial del tacto recogida por las extremidades. El equipo de Gaunt enviaba pequeñas corrientes eléctricas a través de los microelectrodos, y el sujeto refería sensaciones de partes de la superficie de la mano.

Nosotros también hemos realizado implantes similares en el área de la corteza somatosensorial correspondiente al brazo. Con grata sorpresa, nuestro sujeto, FG, refirió impresiones naturales, sensaciones cutáneas como las producidas al apretar o golpear, o vibraciones en la piel. También percibió la sensación de que la extremidad se movía, lo que se conoce como propiocepción. Estos experimentos muestran que los sujetos que han perdido la sensibilidad de las extremidades pueden recuperarla a través de interfaces cerebro-máquina que «escriban» las percepciones. El siguiente paso consistirá en utilizar manos robóticas equipadas con sensores para comprobar si la retroalimentación somatosensorial mejora la destreza robótica bajo el control del cerebro. Además, nos gustaría saber si los sujetos tienen la sensación de «corporeización», en la que el miembro robótico parece convertirse en parte del cuerpo.

Otro desafío importante radica en desarrollar mejores electrodos para enviar y recibir señales neuronales. Hemos determinado que los implantes funcionan durante un período relativamente largo de cinco años. Sin embargo, la optimización de los electrodos extendería aún más la longevidad de estos sistemas y aumentaría el número de neuronas cuya actividad podría registrarse. Otra de las prioridades consistiría en alargar los electrodos, lo que ayudaría a acceder a áreas ubicadas dentro de los pliegues de la corteza.

Los electrodos flexibles, que se muevan con las leves sacudidas del cerebro (debidas a cambios en la presión arterial o al ciclo respiratorio), también permitirán registros más estables. Los dispositivos existentes requieren la recalibración del descodificador, porque los electrodos rígidos cambian su posición con respecto a las neuronas de un día a otro; a los investigadores les gustaría seguir la actividad de neuronas idénticas durante semanas y meses.

Los implantes también han de reducirse en tamaño y funcionar con poca energía (para evitar calentar el cerebro) y de forma inalámbrica, de modo que no se necesiten cables para conectar el dispositivo al tejido cerebral. Las técnicas actuales requieren una intervención quirúrgica. No obstante, confiamos en que algún día se desarrollen interfaces de registro y estimulación que reciban y envíen señales a través del cráneo, y ofrezcan un rendimiento igual a las matrices existentes implantadas mediante cirugía.

Las interfaces cerebro-máquina, lógicamente, tienen por objeto ayudar a personas con parálisis. Sin embargo, en los medios y en los libros y películas de ciencia ficción se emplean para crear «superhumanos», personas a las que se les han conferido habilidades que les permitirían correr más rápido y saltar más alto. Sin embargo, la mejora humana solo se logrará cuando se desarrollen con precisión técnicas no invasivas capaces de detectar la actividad de neuronas individuales.

Por último, me gustaría expresar la satisfacción que produce llevar a cabo una investigación básica y ponerla a disposición de los pacientes. La ciencia fundamental es necesaria tanto para avanzar en el conocimiento como para desarrollar tratamientos médicos. Poder transferir estos descubrimientos a un entorno clínico supone la culminación máxima del esfuerzo investigador. Un científico se queda con la innegable sensación de realización personal al compartir con los pacientes su alegría de poder mover una extremidad robótica para interactuar de nuevo con el mundo físico. IyC

PARA SABER MÁS

Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm. Leigh R. Hochberg et al. en *Nature*, vol. 485, págs. 372–375, mayo de 2012.

High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. Jennifer L. Collinger et al. en *Lancet*, vol. 381, págs. 557–564, febrero de 2013.

Decoding motor imagery from the posterior parietal cortex of a tetraplegic human. Tyson Aflalo et al. en *Science*, vol. 348, págs. 906–910, mayo de 2015.

Intracortical microstimulation of human somatosensory cortex. Sharlene N. Flesher et al. en *Science Translational Medicine*, vol. 8, n.º 361, art. 361ra141, octubre de 2016.

Proprioceptive and cutaneous sensations in humans elicited by intracortical microstimulation. Michelle Armenta Salas et al. en *eLife*, vol. 7, artículo n.º e32904, abril de 2018.

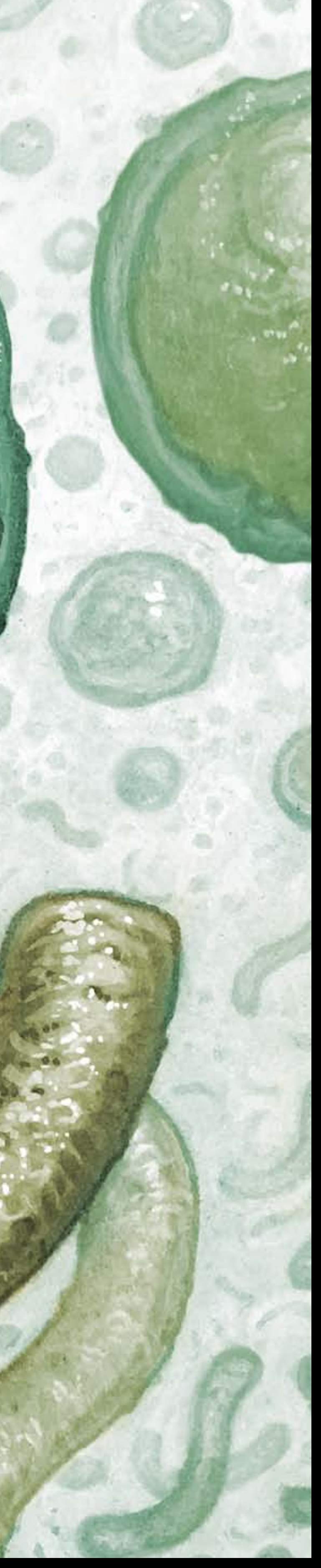
EN NUESTRO ARCHIVO

Mover con la mente. Miguel A. Nicolelis en *IyC*, noviembre de 2012.

Conexiones biónicas. D. Kacy Cullen y Douglas H. Smith en *IyC*, marzo de 2013.

Prótesis más sensibles. Roberta Kwok en *MyC* n.º 67, 2014.





WILLIAM B. HAND

MICROBIOLOGÍA

SIMBIOSIS MICROBIANAS

Las asociaciones bacterianas resultan ser más frecuentes e influyentes de lo que habíamos supuesto jamás

Jeffrey Marlow y Rogier Braakman



Jeffrey Marlow, investigador posdoctoral de la Universidad Harvard, está especializado en la actividad metabólica microbiana de sistemas ambientales complejos.

Rogier Braakman es investigador del Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde estudia la evolución metabólica y las retroalimentaciones entre la Tierra y la vida.

A OCHOCIENTOS METROS BAJO LA SUPERFICIE DEL OCÉANO, LOS FOCOS DEL BATISCAFO *Alvin* revelan un oasis rebosante de color ante la costa de Oregón. El lecho marino aparece alfombrado de tapetes microbianos de tonos blancos, amarillentos y anaranjados, salpicados por campos de almejas y mejillones. Peces de roca encarnados, de lechosos ojos saltones, observan con recelo la nave mientras penachos de burbujas brotan de unos montículos de abigarrada roca calcárea. El halo de luz atrae como un cebo a un buen número de curiosos y muestra retazos de tan extraño dominio, a la par que oculta su extensión real.

Horas antes, uno de los autores (Marlow) se había introducido en la angosta esfera de titanio del *Alvin* con otros dos exploradores para iniciar la inmersión. Corría el año 2010. Mientras descendían por un caleidoscopio de azules, los batinautas apretaban el rostro contra los ojos de buey. Su destino era Hydrate Ridge, una formación rocosa de donde emanan ingentes cantidades de metano desde la corteza terrestre. Con el ritmo al que se descubren las chimeneas de este gas (en una sola expedición al este del Pacífico en 2016 se hallaron 450), se ha desatado una carrera por calibrar su impacto ambiental. Después de todo, el metano es un potente gas de efecto invernadero: pese a constituir solo el 0,00018 por ciento de la atmósfera, representa el 20 por ciento del potencial de calentamiento de la misma. Los cálculos indican que cerca del 10 por ciento del metano atmosférico anual procede de las emanaciones frías del lecho marino. Semejante chorro de burbujas podría causar estragos en el clima si no se controlase, pero algo evita que llegue a la atmósfera más metano: los colonos microscópicos de las emanaciones frías.

Estos microorganismos, que habitan bajo los tapetes blancos y las conchas vacías de los bivalvos, consumen metano con notable voracidad. Minúsculos pero incontables, su actividad contribuye a modelar los paisajes, sustenta los ecosistemas e influye en el clima planetario. Su poder reside en la cooperación. A pesar de que los expertos hace décadas que conocen su existencia, siguen siendo misteriosos en numerosos aspectos. La mayor incógnita es la magnitud de su influencia: ¿viven solo en regiones aisladas del fondo del mar, o están extendidos por doquier? En términos más generales, ¿es su propensión a la cooperación un hecho excepcional, o algo corriente en el mundo microscópico? La opinión predominante durante largo tiempo sostenía que básicamente compiten entre sí por los recursos. Pero tal vez la norma sea realmente la cooperación. Como un punto de luz suspendido en aquella vastedad tenebrosa, descendimos hasta allí para descubrir cuán dominantes son en realidad estas formas de vida.

UN MUNDO MICROSCÓPICO

En cierto sentido, el descenso a los abismos marinos para recolectar seres microscópicos constituye un paso lógico en el afán de la ciencia por conocer los entresijos de nuestro planeta: de qué modo elementos como el carbono, el nitrógeno, el azufre y el fósforo circulan de un ecosistema a otro o cómo se incorporan a la atmósfera los gases de efecto invernadero. A fin de cuentas, vivimos en un mundo dominado por los microbios: desde las rocas que yacen bajo el lecho marino hasta las partículas de polvo del desierto que flotan en las altas capas de la atmósfera, están presentes casi allá donde miremos. Y hace tiempo que sabemos que su cometido en la distribución de tales elementos y compuestos contribuye de manera decisiva a hacer de la Tierra el planeta que es, habitable para animales como nosotros.

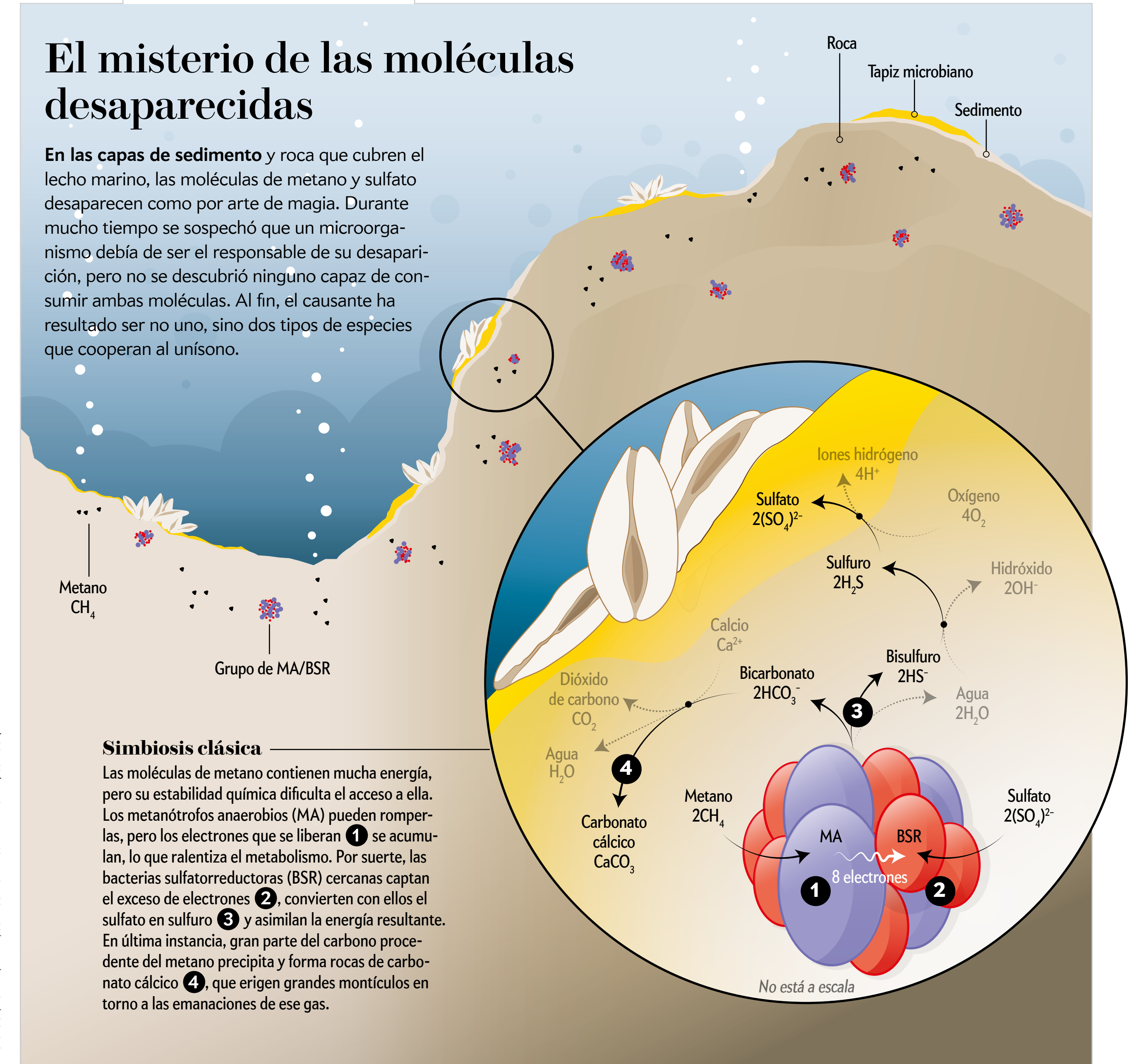
EN SÍNTESIS

Hace tiempo que sabemos de la importancia de los microorganismos como moduladores de la biosfera. La opinión general era que las comunidades microbianas se regían por la competencia para obtener los recursos.

Pero una gran cantidad de nuevos datos sobre los habitantes microscópicos del medio marino y de las aguas subterráneas en todo el mundo han revelado que muchos colaboran.

Estos hallazgos sustentan la teoría de que la interacción y la asociación entre los microorganismos, y no la competencia, serían la norma y la fuerza animadora de la biosfera.

NERISSA ESCANLAR (*referencia para la ilustración de Braakman*)



FUENTES: «A MARINE MICROBIAL CONSORTIUM APPARENTLY MEDIATING ANAEROBIC OXIDATION OF METHANE», ANTJE BOETIUS ET AL. EN *NATURE*, VOL. 407, 5 DE OCTUBRE DE 2000; «SINGLE CELL ACTIVITY REVEALS DIRECT ELECTRON TRANSFER IN METHANOTROPHIC CONSORTIA», SHAWN E. MCGLYNN ET AL. EN *NATURE*, VOL. 526, 22 DE OCTUBRE DE 2015; «METHANE-DERIVED CARBONATES AND AUTHIGENIC PYRITE FROM THE NORTHWESTERN BLACK SEA», PECKMANN ET AL. EN *MARINE GEOLOGY*, VOL. 177, N.º 1–2, 30 DE JUNIO DE 2001. TAMI TOLPA (*ilustración*)

Con todo, el enfoque que hemos venido adoptando para su estudio ha limitado nuestra comprensión de los procesos relevantes a escala planetaria. Durante décadas, las especies individuales y sus componentes moleculares han acaparado el interés. De las ingentes masas microbianas que moran entre los granos de arena se han aislado algunos organismos cuyo escrutinio ha revelado su bioquímica y las funciones de sus genes. Este método ha aportado una gran cantidad de información sobre esas especies, así como del funcionamiento de las células y de las biomoléculas en general. Pero cuando se han querido extender tales estudios a la biosfera como un todo, formado a partir de las especies constituyentes, han quedado grandes lagunas por resolver. Solo se ha podido aislar una pequeña fracción de los microorganismos observados en la naturaleza, un indicio de que las especies que integran las comunidades naturales se entrelazan de un modo que no siempre es posible replicar en el laboratorio. Y la propia coexistencia de numerosas especies abundantes, a menudo con funciones complementarias, parece contradecir la opinión arraigada de que en los ecosistemas microbianos rige la lucha por los recursos, en la que el ganador se lo lleva todo.

Además, las tasas de actividad metabólica de las especies medidas en el laboratorio, como la rapidez con que producen el oxígeno o consumen el nitrógeno, rara vez coinciden con los valores de los ambientes naturales porque las especies susceptibles de ser aisladas en el laboratorio suelen ser más vigorosas que las que no lo son. En otras palabras, el todo es unas veces más y otras veces menos, pero siempre distinto a la suma de las partes.

Ahora, un creciente conjunto de datos sugiere que tales discrepancias son reconciliables si se tiene en cuenta la importancia vital de las interacciones entre los organismos. Durante la

última década, los avances en disciplinas como la secuenciación biomolecular y la obtención de imágenes por microscopía han posibilitado el estudio de las comunidades microbianas de manera más holística que nunca. Los últimos hallazgos indican que la colaboración es un motor crítico de la biosfera: a medida que los organismos evolucionan para compartir energía, información genética y funciones metabólicas, dan origen a nuevas formas de vida y prosperan en hábitats antes inaccesibles.

OCULTOS A LA VISTA

De vuelta a Hydrate Ridge, el brazo robótico del *Alvin* se dispone a hundir un tubo de plástico transparente con el fondo abierto en un tenue tapiz microbiano. Al principio penetra con facilidad, pero pronto queda atascado, la resistencia se transmite al batiscafo y provoca una sacudida súbita. Con un empujón final, el tubo perfora la capa recalcitrante y obtiene una muestra, que deja ir una fina columna de sedimento polvoriento cuando el brazo lo conduce a la cámara de tubos dispuesta al efecto.

Esa misma tarde, en el amplio laboratorio del barco, Marlow y sus colaboradores examinan la sección transversal extraída del fondo marino, de 30 centímetros de largo. Debajo del tapiz microbiano blanco, el lodo parduzco se convierte en una sustancia negra y viscosa que alberga fragmentos de roca (la corteza que se resistió brevemente) antes de quedar reducido a una mezcla gris oscura. Nuestra cantera microbiana se halla en la capa más oscura, que huele a huevos podridos. Trabajos anteriores en la década de 1980 demostraron que esta era la zona donde el metano generado en los horizontes más profundos, así como el sulfato contenido en las aguas que los cubren, eran eliminados del sedimento. Sin embargo, los esfuerzos por descubrir en esta capa especies microbianas que consumiesen simultáneamente metano y sulfato fracasaron una y otra vez. Con otra estrategia, emplear metano y sulfato como cebo para hacer salir al ladrón de su escondite y seguir el rastro de las moléculas a medida que desaparecen del medio experimental, unas investigaciones sorprendentes demostraron poco después del año 2000 que el culpable no era uno, sino varios: grupos de células formados por dos microorganismos que mostraban signos reveladores de actividad metabólica. Uno metabolizaba el metano; el otro respiraba el sulfato.

Este proceso, la oxidación anaeróbica del metano, no sería posible sin el acoplamiento íntimo de los metanótrofos anaerobios con las bacterias sulfatorreductoras. El metano es una molécula tan energética como estable: no es fácil romperla para obtener electrones con los que generar energía metabólica. Los metanótrofos anaerobios pueden hacerlo, pero liberan un excesivo número de electrones. Ello causaría una acumulación que paralizaría su metabolismo de no ser porque el desecho de uno es un tesoro para el otro. Las bacterias sulfatorreductoras toman los electrones sobrantes, convierten con ellos el sulfato en sulfuro (que da al sedimento su olor putrefacto) y aprovechan la energía que se genera. Es una simbiosis clásica: los metanótrofos anaerobios disfrutan de un rápido servicio de recogida de basura y las bacterias reductoras de sulfato gozan de una planta de energía doméstica. La expedición a Hydrate Ridge demostró que el consumo simbiótico de metano se daba no solo en el sedimento, donde se descubrió el fenómeno por primera vez, sino también en las rocas carbonatadas que crean enormes montículos alrededor de las emanaciones de metano en todo el mundo. La interacción entre los metanótrofos anaerobios y las bacterias sulfatorreductoras tiene lugar a escala microscópica, pero investigaciones en el mar Negro, el golfo de México y otros lugares han demostrado que es un proceso generalizado que absorbe cerca del 80 por ciento del metano que emerge del fondo del mar y levanta montículos de carbonato por todo el mundo.

EL ORIGEN DE LA COOPERACIÓN

El vasto subsuelo de la Tierra está lleno de ejemplos semejantes de interacciones microbianas, y las secuencias de ADN obtenidas durante los últimos años de células microbianas halladas en aguas subterráneas y en sedimentos de las profundidades marinas revelan cuán interconectadas están realmente esas comunidades. A medida que las secuencias de ADN van aumentando, dos conclusiones sorprendentes se hacen casi inevitables. En primer lugar, las bacterias y las arqueas son mucho más diversas de lo imaginado, por lo que al árbol de la vida le están brotando multitud de ramas. Pero tal vez lo más sorprendente sea el tamaño increíblemente pequeño de su genoma: en muchos casos no contiene información suficiente para construir una célula plenamente funcional o completar las reacciones metabólicas que convierten los nutrientes en energía. «Lo que estamos viendo siempre que nos adentramos en ambientes nuevos», afirma Laura Hug, profesora de microbiología ambiental en la Universidad de Waterloo y miembro de un equipo que ha descubierto microbios desconocidos, «es que toda la comunidad está capacitada para una función concreta, como el ciclo del nitrógeno. Todas las piezas están ahí, pero es realmente infrecuente descubrir un organismo que las reúna todas en su genoma».

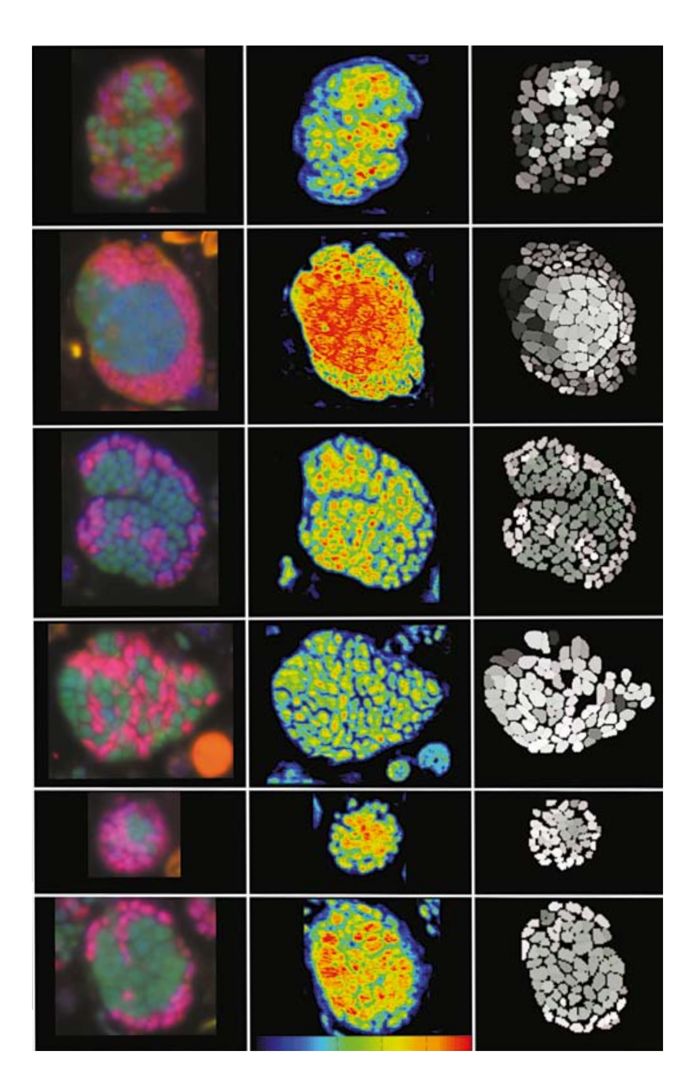
Los genomas de las células recién descubiertas a menudo son incapaces de producir todos los aminoácidos precisos para fabricar las proteínas o los nucleótidos que constituyen el ADN. Eso induce a pensar que consiguen esas unidades básicas de los excedentes dejados por las células vecinas. Estas comunidades también parecen extraer energía del ambiente mediante un proceso colectivo: unas células realizan ciertas conversiones químicas y el producto pasa en cadena a otras que llevarán a cabo nuevas reacciones. Compartir así las unidades básicas de la vida y los recursos energéticos requiere y permite la convivencia de organismos diversos.

Si bien las células estrechamente afines compiten por los mismos recursos, el tesoro recién descubierto que supone la información genética indica que, a mayor escala, la evolución ha promovido la especialización y la colaboración. De la misma manera que la economía mundial capitaliza la potencia local y el intercambio de bienes, las comunidades microbianas de las aguas subterráneas y las grandes profundidades recurren a la división del trabajo para extraer con eficiencia los recursos escasos, haciendo así habitables los ambientes hostiles.

¿Cómo surgen estas colaboraciones vitales en un principio? Algunos creen que la proximidad física en el seno de las comunidades densas es fundamental. Cuando dos organismos vecinos se multiplican, su descendencia permanece cerca. La proximidad conlleva la ventaja de acceder a los recursos parentales, como el universitario alojado en una residencia cercana a su hogar familiar que aprovecha para que le laven la ropa en casa. La selección natural favorece los genes que producen esos recursos compartidos cuando las generaciones siguientes permanecen cerca unas de otras, pero a medida que la proximidad física entre los padres y la descendencia disminuye y entran en escena células genéticamente divergentes, los mutantes aprovechados adquieren una ventaja selectiva. Obtienen rédito de los recursos compartidos sin pagar los costos de producción, se adueñan de la comunidad y reducen la tasa general de recursos disponibles para compartir. (Esta situación se conoce como la tragedia del

bien común, un término acuñado originalmente para describir a un grupo de granjeros con tierras comunales; cada miembro tiene el afán de poseer un rebaño lo más grande posible, lo que aboca al sobrepastoreo y a la ruina económica para todos.) Estas dinámicas muestran que la colaboración y el intercambio quedan favorecidas cuando varias generaciones de una especie permanecen arraigadas en un lugar, principio conocido como selección de grupo.

Pero ¿es este mecanismo de selección de grupo la explicación final de las colaboraciones microbianas tan extendidas que se encuentran en la naturaleza, o intervendrían otros factores? Algunas pistas provienen de cientos de metros por encima de las emanaciones de metano de las profundidades, de las aguas superficiales del mar abierto iluminadas por el sol; allí la energía solar es abundante, pero nutrientes esenciales como el nitrógeno y el fósforo son escasos. De hecho, hasta finales de las décadas de 1970 y 1980 se pensaba que las aguas tropicales y subtropicales de la superficie eran «desiertos», momentos en que el estudio minucioso de estos ambientes sacó a la luz grandes masas de microorganismos. A semejanza de los descubiertos hace unos años en las aguas subterráneas y en los sedimentos de grandes profundidades, estos habitantes de la superficie poseen genomas reducidos y no son cultivables si no se añade al medio de crecimiento conjuntos complejos de nutrientes, un signo claro de que se necesitan los unos a los otros para sobrevivir. Ahora bien, mientras que la microbiota de los sedimentos está confinada en densas jaulas de partículas minerales (una condición perfecta para la selección de grupo), los habitantes de la superficie marina flotan libremente, en perpetua agitación. Sin proximidad constante a vecinos conocidos, la selección de grupo no puede explicar su cooperación. Tiene que intervenir alguna otra fuerza.



AGREGADOS: En las emanaciones de metano pueden observarse asociaciones entre metanótrofos anaerobios y bacterias sulfatorreductoras con diversas técnicas de obtención de imágenes.

DE «SINGLE CELL ACTIVITY REVEALS DIRECT ELECTRON TRANSFER IN METHANOTROPHIC CONSORTIA», SHAWN E. MCGLYNN ET AL. EN *NATURE*, VOL. 526, 22 DE OCTUBRE DE 2015

UNA ASOCIACIÓN QUE CAMBIA LA VIDA

Una sola gota de agua de la superficie marina en los trópicos contiene en torno a un millón de microorganismos. Una décima parte probablemente será una cianobacteria conocida como *Prochlorococcus*, el organismo fotosintético más pequeño y más abundante del planeta. Uno de nosotros (Braakman) ha estado escrutando su ADN junto con otros científicos para saber cómo ha evolucionado su metabolismo durante cientos de millones de años. A partir de las variaciones en su red metabólica (las reacciones bioquímicas que transforman los nutrientes en las unidades básicas de la célula) trazamos un árbol genealógico metabólico de este género, que muestra los vínculos entre los distintos tipos de *Prochlorococcus*. Al comparar ese árbol con los gradientes a gran escala de luz y nutrientes donde habitan cada uno, se hizo evidente que la evolución ha seleccionado las células que captan más energía solar y adquieren más fácilmente los nutrientes escasos. Al mismo tiempo, puesto que la captación eficiente de energía mejora el rendimiento del metabolismo basado en el carbono, las células quedaban saturadas de este elemento. Moléculas energéticamente provechosas, repletas de carbono orgánico, eran liberadas como desechos; una válvula de escape en la poderosa aspiradora capaz de engullir nutrientes cada vez más escasos. Así es como *Prochlorococcus* surgió como una fábrica celular que absorbe luz solar y desprende desechos de carbono orgánico.

Esa corriente de desechos, a su vez, se convirtió en un recurso precioso para otros seres incapaces de producir su energía alimentaria, como *Pelagibacter*, un organismo muy especial que, por así decir, es casi tan abundante como *Prochlorococcus* en las aguas superficiales tropicales y subtropicales. Para investigar la relación entre estos dos grupos microbianos, creamos otro árbol genealógico metabólico de *Pelagibacter* y descubrimos una vía evolutiva que completaba el ciclo de colaboración. Mientras que *Prochlorococcus* consume dióxido de carbono y libera compuestos orgánicos de carbono, *Pelagibacter* toma esos compuestos y desprende otras moléculas que *Prochlorococcus* usa para generar energía cuando el sol se pone. Ambos miembros de la asociación reciclan los residuos del otro y aprovechan una energía que de otro modo se perdería.

Publicados en 2017, estos hallazgos tienen consecuencias importantes en cuanto a la evolución de las comunidades microbianas de la superficie de los océanos y de otros hábitats. La implicación es que a medida que las células captan los nutrientes poco abundantes, las concentraciones de esos elementos en el medio descienden cada vez más, lo que determina su disponibilidad para los demás organismos. Los que viven a expensas de otros no tienen ninguna posibilidad de salir adelante, porque las células que solo consumen pero no producen carbono orgánico son menos competentes para adquirir otros nutrientes, como el nitrógeno o el fósforo. El consumo de nutrientes y la producción de desechos orgánicos están indisolublemente unidos, lo que refuerza la conexión entre *Prochlorococcus* y *Pelagibacter*, que se

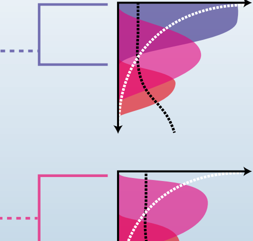
Ha nacido una colaboración

Hace cientos de millones de años, dos de los seres vivos más prolíficos de los mares actuales (*Prochlorococcus y Pelagibacter*) se aliaron para sacar partido de sus respectivos desechos. Esta colaboración pudo sentar las bases para la oxigenación de los océanos, un fenómeno que revolucionó la vida en la Tierra. Estudios recientes sobre la evolución metabólica de ambos han revelado qué factores impulsaron su alianza y cómo se consumó.

Poblaciones ancestrales ocupaban en el pasado remoto gran parte de la zona fótica, iluminada por el sol (*gráfico inferior*). Con el tiempo, la selección natural favoreció aquellas células de *Prochlorococcus* que captaban con más eficiencia la energía solar y asimilaban los escasos nutrientes. Estos recolectores de energía, cada vez más eficaces, redujeron las concentraciones de nutrientes cerca de la superficie del mar, confinando así a aguas más profundas las poblaciones de células que requerían concentraciones mayores. Este desplazamiento dio lugar al modelo de partición visto entre los grupos de *Prochlorococcus* en la actualidad.

Para reconstruir la evolución de *Prochlorococcus*, se cartografiaron las variaciones de su metabolismo (la red bioquímica que convierte los nutrientes en las unidades básicas de la célula) en un árbol genealógico de los grupos de esta cianobacteria. A medida que *Prochlorococcus* evolucionó para absorber cantidades crecientes de luz solar, liberó cantidades cada vez mayores de carbono orgánico como desechos. *Pelagibacter* desarrolló una red metabólica compatible, lo que sugiere que aprovecha esos residuos para obtener energía y libera sus propios desechos, que *Prochlorococcus* emplea a su vez para obtener energía durante la noche.

Prochlorococcus evolucionó a partir de cianobacterias ancestrales. En ese proceso, el genoma se contrajo y sufrió cambios que alteraron las vías metabólicas encargadas de transformar la energía solar en alimentos y eliminar los desechos. Lo que comenzó como un sistema fotosintético que absorbía la luz solar en el espectro verde-azul derivó en un sistema que absorbe básicamente longitudes de onda del azul.



ve potenciada por la selección natural. Este poderoso mecanismo muestra que la promoción evolutiva de las interacciones de colaboración no se aplica solo a grupos íntimamente asociados de células estrechamente relacionadas. Al menos en algunos casos, esta fuerza selectiva puede ser simplemente un subproducto de la selección —un ciclo de retroalimentación autoamplificante— que actúa en las células individuales.

La asociación de *Prochlorococcus* con *Pelagibacter* pudo surgir de unos pocos cambios genéticos pequeños, pero sus efectos a la larga fueron enormes. Cuando los ancestros de ambos colonizaron el mar hace entre 600 y 800 millones de años, en sus aguas abundaba el hierro y escaseaba el oxígeno. El primero es necesario para las proteínas fotosintéticas que en última instancia generan el segundo, pero no puede disolverse y ser incorporado a las proteínas si el oxígeno concurre alrededor. Esta paradoja habría impedido que los organismos fotosintéticos proliferaran en el mar abierto, donde el hierro accesible comenzaría a escasear en cuanto se instalaran y comenzaran a emitir oxígeno en cantidad. Sin embargo, los residuos de carbono orgánico de *Prochlorococcus* —producidos en abundancia al crecer junto con *Pelagibacter*— poseen una gran capacidad para retener este metal, por lo que su disponibilidad aumentó aun en presencia del oxígeno. En suma, planteamos la hipótesis de que, gracias a la interacción entre sus residuos orgánicos y el vital hierro, *Prochlorococcus* y *Pelagibacter* allanaron el camino para que la fotosíntesis oxigenase los mares terrestres. La vida en la Tierra nunca volvería a ser igual.

SEGUNDAS INTENCIONES

Ahora bien, las interacciones microbianas pueden no ser siempre armoniosas. Algunos creen que las relaciones estables y mutuamente beneficiosas podrían ser la excepción, no la regla. «Es un mundo despiadado», dice el biólogo John McCutcheon de la Universidad de Montana. «Incluso relaciones que son temporalmente provechosas en un determinado contexto devienen en parasitismo o competencia en circunstancias ligeramente distintas.» La visión hobbesiana del mundo que tiene McCutcheon proviene en parte del fenómeno que estudia: la endosimbiosis o la incorporación total de un organismo en el seno de otro. Por ejemplo, las mitocondrias que generan energía en nuestras células alguna vez pertenecieron a un grupo conocido como alfaproteobacterias. La endosimbiosis ha propiciado algunas de las innovaciones más notables en la historia de la vida, ha generado los componentes distintivos de las células complejas y allanado el camino para la evolución de las plantas y los animales. Ante estos ejemplos positivos, «es fácil concebirla como un fenómeno altruista, pero creo que es una interacción más explotadora», advierte McCutcheon. Después de todo, señala, la historia evolutiva probablemente esté plagada de intentos fallidos en que la endosimbiosis derivó en depredación o parasitismo.

Los investigadores también han descubierto altas tasas de reemplazo de los endosimbiontes, pues, como sucede cuando un compañero de habitación no se porta bien, una especie incorporada es expulsada y sustituida por otra, lo que revela una relación incómoda para ambas partes. Los estudios de McCutcheon refuerzan la noción de que las interacciones entre los organismos son, de hecho, una fuerza dominante al tiempo que una advertencia sobre sus motivos. «Todo organismo cuida de sí mismo y no todas las interacciones son buenas para todos», señala.

Las comunidades microbianas íntimamente conectadas podrían tener otro gran punto débil: si un miembro resulta gravemente perjudicado, la red de dependencia mutua podría desmoronarse como un castillo de naipes. En teoría, los vínculos metabólicos harían que las comunidades microbianas donde impera una estrecha colaboración resultaran más sensibles que aquellas integradas por organismos menos dependientes, que se ocupan de sus propios asuntos.

La microbióloga Ashley Shade, de la Universidad Estatal de Michigan, y sus colaboradores examinaron 378 estudios de microbiomas del suelo, de aguas marinas y dulces, de intestinos animales y bioindustriales con el fin de elaborar unos principios generales sobre la resistencia de la comunidad a las perturbaciones externas y la capacidad de recuperar el estado inicial. Hallaron que el 56 por ciento de ellos describían cambios metabólicos generalizados después de una alteración; por ejemplo, la exposición al calor hizo que una comunidad aislada del suelo detuviera su consumo habitual de nitrógeno. Solo el 10 por ciento de las comunidades perturbadas acabaron volviendo a la normalidad. (Conviene interpretar estos resultados con cautela, pues muchos de los estudios recopilados que analizaron la resistencia de la comunidad no examinaron su recuperación final. Y en aquellos en que sí se examinó, es posible que no se esperase el tiempo suficiente para ver cómo las cosas volvían a la normalidad.) En última instancia, la biosfera es increíblemente resiliente y siempre se ha recuperado de las grandes perturbaciones —de lo contrario no estaríamos aquí—, pero queda mucho por entender acerca de los procesos de recuperación, cómo son de rápidos y qué cambios persisten.

Aún ignoramos multitud de aspectos sobre las comunidades microbianas naturales y el papel de las colaboraciones. Por lo que sabemos hasta ahora, las alianzas metabólicas parecen impulsar la dinámica evolutiva y facilitar la colonización de vastos entornos nuevos. Pero acabamos de empezar a analizar las interacciones más allá de la escala microscópica, por lo que ubicar estos nuevos hallazgos en contexto en el mundo real sigue siendo arriesgado. ¿Cuántas especies pueden interaccionar de manera significativa? ¿Cómo cambian los principios generales que dan forma a esas interacciones en distintos ambientes o en distintas escalas de espacio y tiempo? La existencia de una densa red microbiana interconectada podría significar que las influencias ambientales motivadas por la actividad humana podrían propagarse a toda la red y acarrear consecuencias mundiales que aún no sabemos predecir. Descifrar esas redes microbianas es crucial, pues entramos en una era de drásticos cambios globales. IyC

PARA SABER MÁS

Carbonate-hosted methanotrophy represents an unrecognized methane sink in the deep sea. Jeffrey J. Marlow et al. en *Nature Communications*, vol. 5, Artículo n.º 5094, 14 de octubre de 2014.

Metabolic evolution and the self-organization of ecosystems. Rogier Braakman et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 114, n.º 15, págs. E3091-E3100, 11 de abril de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Origen de la célula eucariota. Toni Gabaldón en *IyC*, abril de 2005.

Plancton bacteriano de los océanos. José M. González, Carlos Pedrós-Alió y Josep M. Gasol en *IyC*, diciembre de 2008.

Bacterias marinas y cambio climático. Oscar Santegoeds, Laia Angel-Ripoll y Dolors Vaqué en *IyC*, junio de 2009.

La travesía del hierro desde el abismo. Kazuhiro Misumi en *IyC*, noviembre de 2015.

por H. Joachim Schlichting

H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.



Volcanes diminutos en la playa

Las mareas pueden provocar la formación de agujeros y pequeños montículos en la superficie de la playa. El fenómeno obedece al flujo del aire a través del sistema capilar que esconde la arena

En algunas playas, cuando caminamos sobre la zona del terreno que durante la bajamar se encuentra alejada del agua, a veces parecerá que estemos andando sobre algodones. Nuestros pies se hundirán profundamente en la arena y podremos comprobar que, al contrario de lo que suele ocurrir mucho más cerca de la orilla, allí no se ha creado una superficie firme.

Más aún, en esas partes blandas del terreno podremos ver con frecuencia un buen número de agujeros, así como verdaderas protuberancias, como si se tratase de pequeños volcanes. Y si tomamos del suelo un puñado de arena, con cuidado para no aplastarla, nos encontraremos con una especie de «espuma»: una estructura salpicada de cavidades de distintos tamaños. ¿A qué se debe este fenómeno?

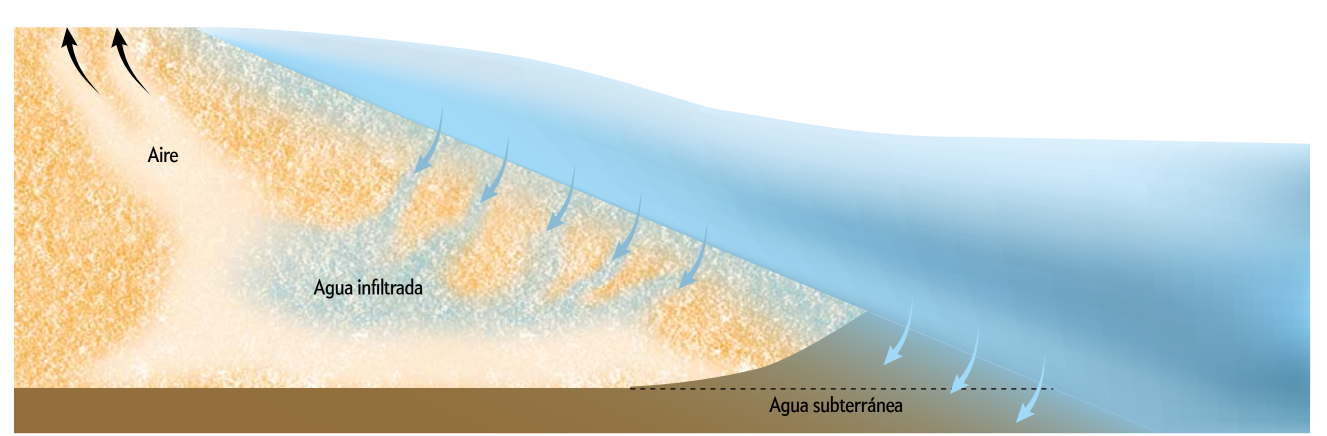
Capilares subterráneos

Si observamos el fenómeno durante varios días, podremos comprobar que la responsable de esta filtración de aire a través de la arena es la marea. La arena consta de granos de forma irregular que solo se tocan en algunos puntos, por lo que dejan entre medias un sistema de capilares interconectados. Cuando el agua se filtra desde arriba, desplaza con su peso el aire contenido en esos capilares. Sin embargo, este no podrá escapar indefinidamente hacia abajo, ya que antes o después se encontrará con el nivel freático del agua subterránea, la cual ya habrá llenado los espacios vacíos inferiores. Así pues, cuando sube la marea, el agua empuja el aire y lo dirige hacia arriba (*véase la ilustración*).

Lo anterior hace que aumente la presión del gas, ya que los estrechos capilares oponen resistencia a la circulación. Se trata de un fenómeno parecido al que tiene lugar cuando intentamos expulsar el agua de una jeringuilla que contiene en su interior una burbuja de aire: el pistón comprimirá la burbuja de manera considerable. Expuestas a una presión semejante, las delgadas corrientes de aire que circulan bajo el suelo se unirán tan pronto como entren en contacto y, antes o después, prorrumpirán en la superficie.

Cuando eso ocurre, aparecen agujeros en algunos sitios del suelo y, en otros, pequeños abultamientos cónicos, los cuales se formarán siempre que la capa superior posea partes herméticas (y que, por tanto, impidan el paso del aire). Ambas estructuras dan lugar a la «espuma de arena» que mencionábamos al principio, y cuando baje la marea podremos verla con claridad. Si seccionamos cuidadosamente los conos con un cuchillo, nos convenceremos de que realmente existen cavidades bajo las protuberancias.

Cuando sube el nivel del mar, a veces es posible apreciar la manera en que el rítmico ir y venir de las olas inunda los agujeros y los deja libres de nuevo. Justo en el borde del agua, donde la profundidad es de tan solo unos pocos centímetros, pueden verse cómo salen burbujas de los agujeros anegados. La bajada de la marea vuelve a drenar el sistema capilar, ahora lleno, y las grandes cavidades. Ello



FLUJO SUBTERRÁNEO: Durante la marea alta, el agua penetra en la arena (*flechas azules, representación esquemática*) por acción de su propio peso. Allí inunda los capilares existentes entre los granos de arena, previamente llenos de aire. Este no puede escapar hacia abajo, ya que se encontrará con zonas anegadas de agua subterránea (*marrón*), por lo que acabará dirigiéndose hacia la zona superior de la playa (*flechas negras*).

reduce la presión y hace que se absorba aire; entretanto, a veces aparecen nuevos agujeros.

Manchas claras y oscuras

Los mismos procesos nos permiten explicar otro fenómeno que en ocasiones puede observarse en la zona en que el agua se acerca y se retira: la aparición de manchas oscuras distribuidas sobre la arena. Si bien tales manchas suelen adoptar una distribución caótica, en ocasiones también pueden dar lugar a un patrón relativamente ordenado. ¿Cómo es posible?

Un examen detallado deja claro que la causa de este estampado se halla en la separación de los granos de arena claros y oscuros. El color no es más que el signo visible de una diferencia física más importante: su masa. Para comprobarlo, basta con recoger aproximadamente la misma cantidad de cada tipo de arena y pesarlas. En la playa cuyas imágenes se reproducen aquí, la arena oscura presentaba una densidad mayor que la clara. Debido a esa diferencia, el viento a menudo las separa y crea capas superpuestas de uno y otro material.

Dado que, por lo general, las protuberancias cónicas no desempeñan ningún papel en la expulsión del aire, cuando llega la siguiente pleamar se inundan y se aplanan parcialmente. En los abultamientos, anteriormente llenos de aire, el agua elimina primero la capa superior de arena, normalmente clara, y saca a la luz la capa oscura que hay debajo. A veces el mar arrastra también parte de ella y deja al descubierto la siguiente capa de arena clara. Como resultado, surgen estructuras anulares.

A menudo la marea se lleva consigo parte de estos granos de arena al retirarse y deja huellas con forma de hebra. Su origen puede desconcertar a quien pasee por la playa, sobre todo si lo hace durante la bajamar y no intuye la creativa labor que, en su ir y venir, estuvieron haciendo allí las olas unas horas antes. IyC

PARA SABER MÁS

Subsurface processes generated by bore-driven swash on coarse-grained beaches. Kate Steenhauer et al. en *Journal of Geophysical Research*, vol. 116, art. C04013, abril de 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

El secreto de los castillos de arena. H. Joachim Schlichting en *IyC*, julio de 2015.

FOTOGRAFÍAS DE H. JOACHIM SCHLICHTING

1



2



1. ESPUMA DE ARENA: Cuando baja la marea y el agua se retira, la zona más alejada de la orilla queda repleta de agujeros y pequeñas protuberancias cónicas. El fenómeno se debe al flujo del aire por los capilares que forma la arena bajo la superficie.

2. HUELLAS PROFUNDAS: Durante la bajamar, caminar sobre una arena blanda y salpicada de burbujas de aire deja huellas mucho más profundas que en la zona inmediatamente próxima a la orilla.

3. PATRONES CROMÁTICOS: Cuando la marea vuelve a subir y alisa el suelo, en ocasiones deja tras de sí un llamativo estampado de manchas claras y oscuras. El color pone de manifiesto la densidad de los distintos tipos de arena presentes en la playa.

3



José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

Las revoluciones de Lavoisier

Del *Traité élémentaire de chimie* a la guillotina

José Manuel Sánchez Ron

En un libro que es ya un clásico de la historia y metodología de la ciencia, *La estructura de las revoluciones científicas* (1962), el físico reconvertido en historiador de la ciencia Thomas S. Kuhn explicó que antes de que proliferaran, a comienzos del siglo xix, los libros de texto científicos en los que se exponían los cuerpos de las teorías aceptadas, «muchos de los libros clásicos famosos de la ciencia desempeñaban una función similar. La *Física* de Aristóteles, el *Almagesto* de Ptolomeo, los *Principia* y la *Óptica* de Newton, la *Electricidad* de Franklin, la *Química* de Lavoisier y la *Geología* de Lyell, estas y muchas otras obras sirvieron implícitamente, durante cierto tiempo, para definir los problemas y métodos legítimos de un campo de investigación para generaciones sucesivas de estudiantes».

Todas esas obras —salvo, si acaso, la de Franklin— influyeron poderosamente en las ciencias a las que estaban dedicadas. Pero una de ellas posee el añadido especial del momento en el que se publicó y del destino que aquel mundo político produjo en su autor, el químico Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), «el Newton de la química», el «padre» de la química moderna. El título completo de ese libro es *Traité élémentaire de chimie, presenté dans un ordre nouveau et d'après les decouvertes modernes* («Tratado elemental de química, presentado en un orden nuevo según los descubrimientos modernos») y vio la luz, en París, en 1789, el mismo año en que se inició la Revolución francesa.

Antoine Laurent de Lavoisier

La manipulación de elementos y compuestos químicos tiene una larga historia. En este sentido, la química posee raíces lejanas en el tiempo. En cambio, no ocurre lo mismo en lo que se refiere a disponer de un sistema teórico organizado y eficaz, pues esto no llegó hasta la segunda mitad del siglo xviii. Resulta ilustrativa la entrada dedicada a la «química» en el tomo III, publicado en 1753, de la *Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, dirigida por Diderot y D'Alembert, de la que fue responsable el médico, farmacéutico y químico francés Gabriel François Venel (1723-1775): «Está claro que la revolución que situará a la química en el rango que merece, que la pondrá al menos al lado de la física, que esta revolución, digo [Venel], no puede ser producida más que por un químico hábil, entusiasta y atrevido que, encontrándose en una situación favorable y aprovechándose hábilmente de algunas circunstancias felices, sepa despertar la atención de los sabios, primero con una ostentación brillante, con un tono decidido y afirmativo, y después con argumentos si sus primeras armas hubieran atacado algún prejuicio».

Los deseos de Venel no tardarían en cumplirse: Antoine Laurent de Lavoisier, que entonces contaba solo diez años, se llamaría ese químico «hábil, entusiasta y atrevido».

Hijo de un próspero abogado de París, Lavoisier estudió derecho, aunque terminó brillando en la ciencia. Sin embargo, no descuidó asuntos más mundanos: fue accionista de la Ferme Générale, una institución privada en la que la coro-



David Pinxt W.C. Sharpe

LAVOISIER.

ANTOINE LAURENT DE LAVOISIER

na francesa había delegado la recaudación de impuestos. Lo que hizo para entrar en ella fue comprar un tercio de una participación. En calidad de *férmier* (recaudador), Lavoisier estaba obligado a realizar giras de inspección e informar de sus observaciones a los directores de la compañía, *férmiers* más veteranos como Jacques Paulze, con cuya hija Marie-Anne Pierrette Paulze (1758-1836) se casó en 1771, el mismo año que Lavoisier incrementó su participación en la Ferme: con una inversión de 780.000 francos —una fortuna— adquirió la mitad de una participación.

Como buen ilustrado, Lavoisier no fue ajeno a la actividad pública. En 1775 fue nombrado uno de los cuatro directores de la Real Fábrica de Pólvoras (*Régie des Poudres*), la institución estatal encargada de la producción de pólvoras y salitres, puesto que mantuvo hasta 1791; en 1787 fue elegido representante del Tercer Estado en la Asamblea Provincial de Orleans, y en 1789, diputado suplente por la nobleza de Bois en los Estados Generales y miembro de la Comuna de París.

En lo que se refiere a la química, los conceptos fundamentales que encabezaron la revolución fueron los relativos a dos procesos básicos: la combustión y la calcinación. La combustión (según la visión actual, la reacción química entre el oxígeno y un material oxidable acompañada de desprendimiento de energía) pasó, gracias a él, a explicarse de una forma muy distinta a como se hacía en la teoría más influyente de la química precedente, la del flogisto. Según esta —que tuvo entre sus principales defensores al alemán Georg Stahl (1659-1734)—, la capacidad que tiene un cuerpo para arder se debe a la existencia en su composición de una sustancia llamada flogisto (del griego *filox,* esto es, «llama»; por consiguiente, literalmente «principio de la llama»). Asimismo, para que un metal se calcine (la calcinación corresponde a la transformación por oxidación de un metal a su mineral o cal), era indispensable que el flogisto formara parte de su composición. En las dos operaciones, combustión y calcinación, tenía lugar el mismo proceso: desprendimiento de flogisto de las sustancias que lo contenían. Cuando la combustión y la calcinación se llevaban a cabo en recipientes cerrados, llegaba un momento en que el proceso se detenía; la teoría explicaba este hecho postulando que el aire contenido en el recipiente se saturaba del flogisto desprendido y no admitía más adiciones.

A finales de 1772, Lavoisier demostró que tanto el fósforo como el azufre se combinaban con el aire durante la combustión, y que los productos obtenidos (los ácidos fosfórico y sulfúrico) pesaban más que el fósforo y el azufre iniciales. Se trataba, por consiguiente, de un proceso de adición, en lugar de uno en el que se producía un desprendimiento (de flogisto). A lo largo de los dos años siguientes, comprobó que la calcinación era un proceso similar a la combustión; esto es, que cuando un metal se calcinaba, se unía a una parte del aire circundante, aumentando de peso.

En octubre de 1774, Joseph Priestley (1733-1804) comunicó a Lavoisier que había estudiado un gas que resultaba más apto que el «aire común» para mantener la combustión. Dado que podía recibir mucho flogisto —creía todavía en esta teoría—, favoreciendo la combustión de otros cuerpos, le había dado el nombre de «aire desflogisticado». Lavoisier comprendió pronto el papel fundamental que este nuevo gas desempeñaba en la combustión y la calcinación, que pasaron a convertirse en procesos que implicaban la absorción o combinación de un nuevo elemento, un aire al que bautizaría con el nombre de «oxígeno». El aire común, o atmosférico, no era una sustancia simple, sino que se componía de dos o más elementales, algo que ya habían comprobado, con diferentes grados de certidumbre, Stephen Hales (1677-1761), Henry Cavendish (1731-1810), Joseph Black (1728-1799), Wilhelm Scheele (1742-1786) y el citado Priestley.

Otro apartado destacado de la nueva química de Lavoisier tuvo que ver con el agua, el componente más universal de la naturaleza, que, al igual que el aire atmosférico, dejó de ser considerada una sustancia simple (logro en el que también participó Cavendish). «Hasta nuestros días —escribió Lavoisier en su *Traité élémentaire de chimie*, en donde explicó el procedimiento que había seguido en este descubrimiento (que publicó en 1781)—, el agua se había considerado un cuerpo simple, y los antiguos no tuvieron dificultad alguna en llamarla elemento. Para ellos era, sin duda, una sustancia elemental, puesto que no habían conseguido descomponerla o, al menos, porque las descomposiciones del agua que tenían lugar diariamente ante su vista escapaban de sus observaciones. Pero ahora [...] el agua ya no es para nosotros un elemento».

El *Traité élémentaire de chimie*

Más allá de ser un espléndido libro de química, el *Traité* constituyó el vehículo mediante el cual su autor presentó a una audiencia más amplia el nuevo sistema químico que había desarrollado. Desde este punto de vista, se trataba de una obra que se imponía escribir. De hecho, la correspondencia de Lavoisier contiene muestras de que así fue; más aún, también otros químicos pensaron en los mismos términos. El 17 de enero de 1789, Jean-Baptiste van Mons (1765-1842), maestro farmacéutico de Bruselas y entusiasta partidario de la nueva química de Lavoisier, así como adepto vigoroso de las ideas revolucionarias, escribía a Lavoisier:

Señor,

La inclinación de los animales de costumbre a favor de lo que es antiguo, el odio nacional, la envidia acaso nacional también, pero siempre personal y, como acaba de decir un flogístico poco considerado, el temor de los químicos a ver olvidadas sus obras, se encuentran entre los obstáculos que el tiempo y la razón deberán vencer antes de que vuestra teoría sea adoptada universalmente.

Considerando estos obstáculos desde más cerca, es fácil identificar su causa. Alemania jamás verá con buenos ojos que se le arrebate un niño nacido y educado en su seno, e Inglaterra no será la primera en poner esta corona sobre la cabeza de un rival [Van Mons aludía a la teoría química del flogisto, en cuya cabeza se hallaba el alemán Stahl, y a los trabajos pioneros de los ingleses Black y Priestley].

Con todo esto, señor, no concibo cómo se puede tener buena fe y aun así rechazar la obviedad. Pero tal parece ser la debilidad del espíritu humano cuando se le anuncia una evidencia manifiesta; acostumbrado a la oscuridad, e incapaz de soportar el brillo de esta viva luz, se desvía y se aparta durante algún tiempo ante la claridad que le deslumbra.

Entre las causas que más retrasan la propagación de vuestra doctrina se encuentra, como he observado bastantes veces en

conversaciones particulares que he tenido con sabios en este país y sobre todo con los profesores holandeses, el que muchas personas no poseen más que un conocimiento imperfecto de los principios sobre los que reposa. Una explicación un poco más amplia me ha permitido convencerlos siempre.

Para eliminar en parte este obstáculo, hace algún tiempo he leído en la Sociedad de Física Experimental, nuevamente establecida en esta villa bajo los auspicios de Su Majestad, una memoria sobre la diferencia entre las dos doctrinas y la preeminencia de la vuestra y cuento con ofrecer al público en los próximos días una pequeña obra bajo el título Essai sur les principes de la nouvelle theorie chymique *en la que reuniré las partes dispersas de vuestra doctrina, ¡intentando presentarla con orden y claridad! Este ensayo también será traducido al holandés por el famoso profesor Rumpel [probablemente se trataba del médico y químico John Dalrymple, conocido como Rumpel].*



LOS RECAUDADORES GENERALES ante el tribunal revolucionario, el 8 de mayo de 1794.

Van Mons no llegó a publicar la obra que mencionaba, que finalmente pensaba titular *Essai sur les principes de la chimie antiphlogistique*. La inminente publicación del *Traité* de Lavoisier, del que Van Mons parecía no tener noticia, lo hizo innecesario. En este sentido, el 2 de febrero Lavoisier contestaba a Van Mons:

Le agradezco mucho, Señor, el interés que ha tenido a bien testimoniarme por una doctrina que yo he creado y que espero que no tardará en producir una completa revolución en la forma de enseñar la química. No hay por qué asombrarse de que estas novedades asusten; hace falta un punto de madurez y el de la doctrina moderna me parece que lo proporciona. Es de desear que buenos espíritus como usted quieran encargarse de propagar los conocimientos y espero con impaciencia que tenga usted a bien comunicarme la memoria que ha leído en la sociedad de física experimental establecida en Bruselas. Por mi parte, trabajo en un tratado elemental de química que sigue la nueva doctrina y que va a aparecer pronto.

Y realmente apareció pronto, como muestra el contenido de la nota que el 15 de febrero Lavoisier enviaba a Jean-Gaspard Dubois de Fontanelle (1727-1812), desde 1784 redactor del periódico *Gazette de France*:

La Academia Real de Ciencias ha tenido el honor de presentar al Rey, a la reina y a la familia real el volumen de sus memorias correspondientes al año 1786. Al mismo tiempo, M. Dionis du Sejour presentó el segundo volumen de su tratado analítico de los movimientos aparentes de los cuerpos celestes y M. Lavoisier un tratado elemental de química con planchas y descripciones de todos los aparatos relativos a los descubrimientos modernos. Esta obra se pondrá a la venta en el corriente mes de marzo en la librería Cuchet, de la calle y hotel Serpente.

El ejemplar que Lavoisier presentó al rey (conservado en la actualidad en la Biblioteca Nacional francesa, encuadernado con el escudo de armas de María Antonieta) pertenece a una edición preliminar del *Traité*, la única encuadernada en un solo volumen (558 páginas). Debieron imprimirse pocos ejemplares de esta edición, que Lavoisier distribuyó en el mes de marzo. A esta siguió, parece que en mayo si no en abril, la edición canónica, en dos tomos.

Víctima de la guillotina

1789, el año de la publicación del *Traité*, no fue un año cualquiera, sino el que alumbró la Revolución francesa: el 14 de julio masas parisinas tomaron la Bastilla, el odiado símbolo de un régimen que ya no se quería. Lavoisier, entonces en la cumbre de su poder y prestigio, científico y público, no pudo permanecer al margen de aquel proceso, en el que las ansias de libertad e igualdad a menudo se combinaron con la crueldad, el vandalismo y el terror.

Durante algún tiempo, el nuevo régimen contó con él. Fue nombrado miembro del Bureau de Consultation des Arts et Métiers (Departamento de Consultas de Artes y Oficios), organismo creado el 13 de septiembre de 1791 para proporcionar al Gobierno informes sobre los inventos útiles y establecer las correspondientes recompensas. Preparó varios informes y asistió a sus sesiones hasta el mismo día que fue arrestado, el 28 de noviembre de 1793 (8 de Frimario del año I, de acuerdo con la nueva cronología revolucionaria), poco más de un mes después de haber sido, el 2 de octubre, nombrado presidente del Bureau. En el registro de la

prisión de Port Libre (posteriormente Hospital de la Maternidad) en la que fue confinado, se anotó simplemente:

El 8 de Frimario,
Lavoisier, hasta ahora férmier général.
Motivo: para rendir cuentas.
Orden de la policía.

Ser *férmier* era, como vemos, la gran acusación. El mismo día, su suegro, Jacques Paulze (que entonces tenía 71 años), también fue hecho preso. Unos días antes, el 4 y 5 de Frimario, lo habían sido otros *férmiers*. El resto lo sería poco después.

En una nota que escribió durante los meses que pasó en prisión, Lavoisier defendió (refiriéndose a sí mismo en tercera persona) con orgullo su carrera como científico y ciudadano:

Lavoisier, miembro de casi todas las academias de Europa, ha consagrado su vida principalmente a trabajos relativos a la física y a la química.

Durante los veinticinco años que ha sido miembro de la Academia de Ciencias, ha hecho imprimir en sus Actas más de 80 memorias, de las que una gran parte contienen descubrimientos importantes para las artes, las ciencias y la humanidad. Ha consagrado a este fin una parte importante de su fortuna.

Se ha ocupado principalmente de experimentos de agricultura muy onerosos que ha continuado durante quince años y en los cuales ha sacrificado más de 120.000 libras; se propone incesantemente publicar una obra importante sobre este tema.

No esperó en ningún momento la época de la Revolución para manifestar sus principios sobre la libertad y la igualdad.

Sin duda, creía lo que escribió, que había amado la libertad y la igualdad siempre, solo que la libertad e igualdad del *férmier général* no era, claro, la libertad e igualdad del pueblo llano, de los *sans-culottes* que tomaron la Bastilla. Si estos —impulsados, no hay que olvidarlo, entre otros, por filósofos ilustrados— desencadenaron un proceso político que influiría poderosamente en el curso posterior de la historia de la humanidad, también hizo lo mismo, aunque en otros apartados, el contenido del *Traité élémentaire de chimie*. Pero los revolucionarios que se unieron en la entrada del suburbio de Saint-Antoine para marchar hacia la Bastilla no estaban interesados en esa obra, fuera del alcance de la comprensión de la mayoría, entre otras razones porque muchos no sabrían leer.

El 7 de mayo de 1794 (el 18 de Floreal del año II) Lavoisier escribió a su primo Augez de Villers:

He desarrollado una carrera razonablemente larga, y de bastante éxito, y creo que mi memoria será acompañada con algunos lamentos, acaso con alguna gloria. ¿Qué más podría haber deseado pedir? Los sucesos de los que me encuentro rodeado probablemente me evitarán los inconvenientes de la vejez. Moriré todo entero, lo que todavía constituye una ventaja que debo contar con respecto a aquellos con los que disfruté. Si experimento algunos sentimientos penosos, es por no haber hecho más por mi familia; es por haber sido desposeído de todo y no poderles dar ni a ella ni a vosotros ninguna prueba de mi cariño y agradecimiento.

Es cierto que el ejercicio de todas las virtudes sociales, de servicios importantes prestados a la patria, una carrera empleada con provecho para el progreso de las artes y los conocimientos humanos no bastan para protegerme de un fin siniestro y para evitar perecer como un culpable.

Te escribo hoy porque mañana tal vez ya no me será permitido hacerlo y porque para mí, en estos últimos momentos, es un dulce consuelo ocuparme de vosotros y de las personas que me son queridas. No me olvidéis junto a aquellos que se interesan por mí; que esta carta sea común. Es verdaderamente la última que os escribo.

Lavoisier

Al día siguiente, tal y como sospechaba o sabía, después de interrogar a los acusados (de conspirar contra el pueblo de Francia), 28 *férmiers*, el tribunal revolucionario los condenó a la pena de muerte, que se debía ejecutar dentro de las siguientes 24 horas. Sin embargo, no se esperó demasiado: fueron ejecutados, en la guillotina, el mismo 8 de mayo, siguiendo el orden que aparecía en el acta de acusación. Lavoisier era el quinto, justo después de su suegro, cuya cabeza vio, por consiguiente, caer. Sus restos fueron arrojados al cementerio de la Madeleine. Al día siguiente, Lagrange le dijo a Delambre: «No ha hecho falta más que un instante para cortar esa cabeza, puede que cien años no basten para producir otra igual». Dadas las circunstancias, constituyó un buen epitafio.

PARA SABER MÁS

Lavoisier, 1743-1794, d'aprés sa correspondance, ses manuscrits, ses papiers de famille et d'autres documents inédits. Édouard Grimaux. Félix Alcan, París, 1888.
Oeuvres de Lavoisier, Correspondence, vol. VI (1789-1791). Dirigido por Patrice Bret. Académie des Sciences-Librairie Albert Blanchard, París, 1997.
Oeuvres de Lavoisier, Correspondence, vol. VII (1792-1794). Dirigido por Patrice Bret. Académie des Sciences-Éditions Hermann, París, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Lavoiser. La revolución química. Marco Beretta. Colección *TEMAS* de *IyC*, n.º 64, 2011.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Actualmente dirige la colección de libros *Grandes ideas de las matemáticas*, de Ediciones El País.



Quiritmética

Química y física de los números primos

En matemáticas la mayoría de las cosas son abstractas, pero con los números primos tengo la sensación de que puedo tocarlos, como si estuvieran hechos realmente de materia física.

—Karl Sabbagh, *Dr. Riemann's zeros.*

En 1869, el químico ruso Dimitri Mendeléiev ordenó los elementos químicos conocidos en la célebre tabla periódica. Gracias a ella, fue capaz de predecir la existencia y las propiedades de aquellos elementos que debían ocupar las casillas entonces vacías. Ciento cincuenta años después, en conmemoración de este hito, las Naciones Unidas han proclamado 2019 como Año Internacional de la Tabla Periódica. Desde esta columna matemática queremos contribuir a su celebración presentando una nueva disciplina: la *quiritmética*.

La materia está formada por átomos. Las reacciones químicas no pueden descomponer un átomo en entidades más simples; de hecho, la voz *átomo* proviene del griego *átomon*, que significa «indivisible».

En matemáticas contamos con algo similar. Decimos que un entero mayor que 1 es un número primo si y solo si tiene como únicos divisores a 1 y a él mismo. El término *primo* hace referencia a su carácter primario, o primigenio. Y, al igual que los átomos son los integrantes esenciales e indivisibles de la materia, podemos decir que los números primos son los constituyentes básicos de los números naturales. En la quiritmética, los números primos serán nuestros átomos, indivisibles e irreducibles.

El teorema fundamental de la quiritmética establece que los números primos son los ladrillos básicos de los que están formados todos los naturales. Reza así: «Todo entero positivo mayor que uno puede escribirse de forma única como producto de factores primos». Por ejemplo, la «molécula» de 500 está formada por dos «átomos» de 2 y tres de 5: $500 = 2^2 5^3$.

Reacciones quiritméticas

Para construir una química artificial como la quiritmética no necesitamos más que una colección de átomos, moléculas y unas reglas de reacción que nos digan cómo se combinan. Nosotros usaremos un «gas» compuesto por $N \ll M$ números, los cuales habrán sido escogidos aleatoriamente del conjunto $C(M)$, formado por los M primeros números naturales menos el 1:

$$C(M) = \{2, 3, 4, \ldots, M\}\,.$$

Ahora tomaremos al azar dos números a y b de los N que forman nuestro gas —esto será el equivalente a un encuentro aleatorio de dos moléculas— y aplicaremos las siguientes reglas de reacción quiritmética:

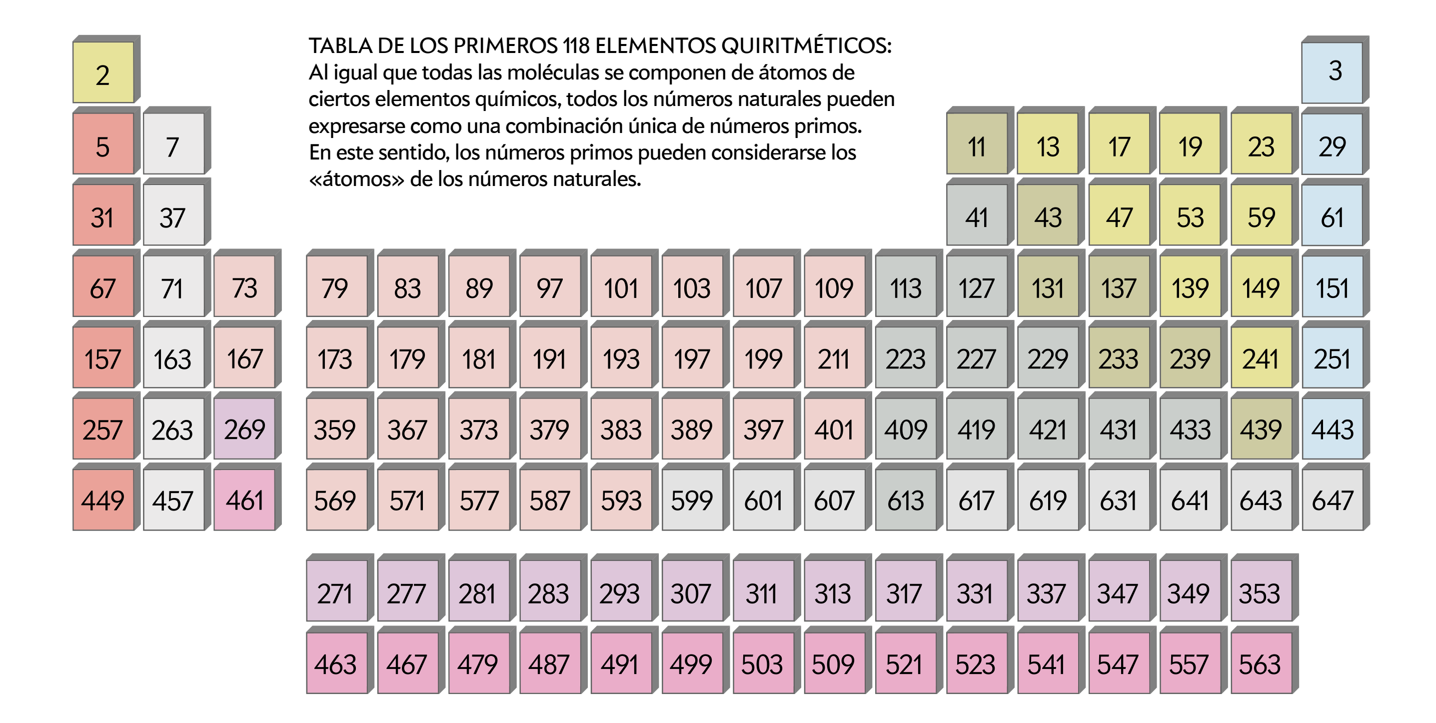
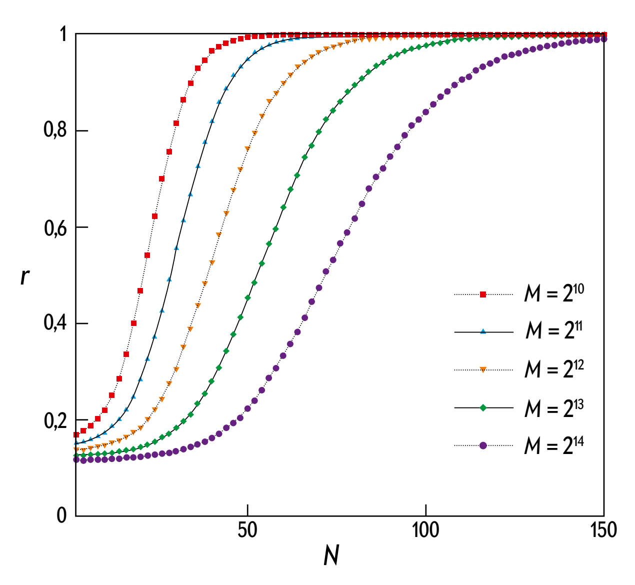
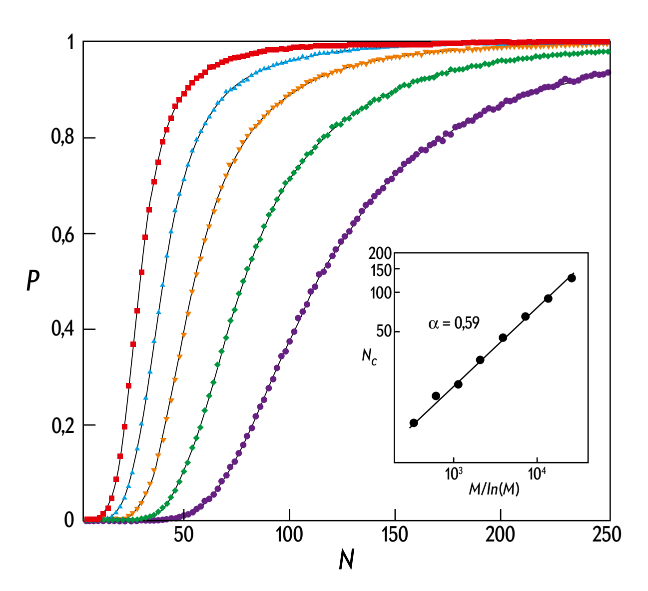


TABLA DE LOS PRIMEROS 118 ELEMENTOS QUIRITMÉTICOS: Al igual que todas las moléculas se componen de átomos de ciertos elementos químicos, todos los números naturales pueden expresarse como una combinación única de números primos. En este sentido, los números primos pueden considerarse los «átomos» de los números naturales.





1. TRANSICIÓN DE FASE: Simulación numérica de la proporción *r* de números primos presentes en el estado final de varios «gases» de *N* números tomados al azar de entre los *M* primeros naturales menos el 1. Al variar *N*, el sistema experimenta una transición desde una «fase desordenada», caracterizada por una proporción baja de números primos (*izquierda*), hacia una «ordenada», en la que todas las moléculas se han descompuesto en factores primos (*derecha*).

2. PARÁMETRO DE ORDEN: Probabilidad $P_M(N)$ de que un gas de *N* números acabe en un estado en el que todos ellos se han descompuesto en factores primos. P_M y *N* se comportan del mismo modo que el parámetro de orden y el parámetro de control de las transiciones de fase orden-desorden en mecánica estadística. El valor de *N* donde ocurre la transición de fase, N_C, varía como una potencia de $M/\log M$ con exponente $\alpha = 0{,}59$ (*inserto, escala logarítmica*).

Regla 1: Si $a > b$, ambos reaccionarán si a es múltiplo de b. En tal caso, la reacción quedará descrita por el proceso

$$a \oplus b \rightarrow c \oplus b \,,$$

donde el producto c vendrá dado por $c = a/b$. El resultado será por tanto la reducción del número compuesto a para dar un número «más simple», c, bajo la acción catalítica de b.

Regla 2: Si ningún número es múltiplo o divisor del otro, así como en el caso de que ambos sean iguales, no habrá reacción. Diremos entonces que se ha producido un choque elástico entre nuestros átomos o moléculas y que, como consecuencia, han permanecido inalterados.

Observemos que, ocurra lo que ocurra, el número de moléculas en nuestro gas seguirá siendo *N*. Veamos un ejemplo de reacción quiritmética. Supongamos que nuestro gas está formado por dos moléculas: $a = 500 = 2^2 5^3$ y $b = 25 = 5^2$. Al encontrarse reaccionarán, ya que 500 es múltiplo de 25, de modo que

$$500 \oplus 25 \rightarrow 20 \oplus 25 \,.$$

Vemos que la molécula de 500 se convierte en 20. Dado que 20 y 25 no pueden reaccionar, la actividad quiritmética cesará aquí. En este momento habremos alcanzado un estado de equilibrio estacionario.

Ya estamos preparados para llevar a cabo nuestros experimentos de laboratorio; solo que, en vez de usar un matraz, utilizaremos un ordenador. Después de extraer aleatoriamente del conjunto $C(M)$ una colección de *N* números para formar nuestro gas, elegiremos al azar dos moléculas y aplicaremos las reglas de reacción. *N* repeticiones de este proceso constituirán un paso de tiempo en nuestro sistema.

Observemos que las reglas quiritméticas tienden a reducir los números compuestos, a hacerlos más pequeños, y que un número primo es siempre irreducible. Diremos que el sistema ha alcanzado el equilibrio estacionario cuando no pueden lograrse más reacciones, ya sea porque todos los números se han convertido en primos o porque ya no es posible hacer más divisiones. En todo caso, nuestro gas acabará generando una cierta cantidad final de números primos.

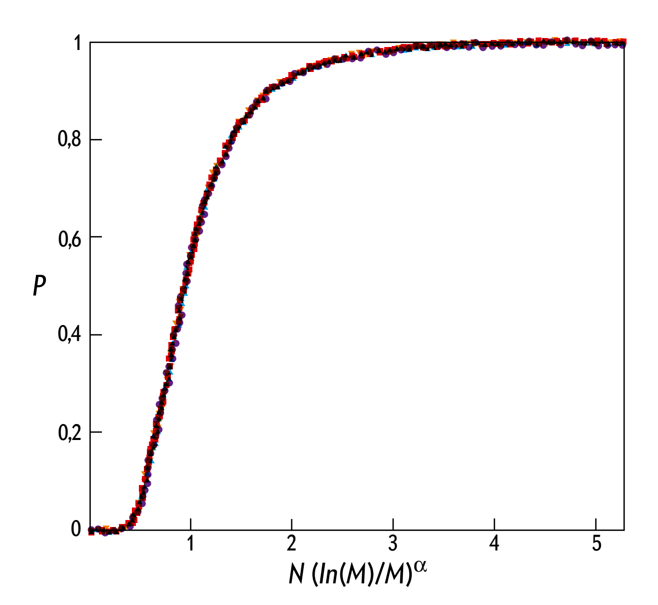
Fases de la materia numérica

Fijado *M*, ¿qué capacidad tiene un gas de *N* números para generar primos? Podemos determinar fácilmente esta propiedad midiendo qué fracción de números primos aparecen en el estado final estacionario. La figura 1 muestra la relación entre *r* y *N* para distintos valores de *M*. Cada punto de la gráfica es el resultado de promediar 20.000 experimentos quiritméticos.

En cada curva podemos diferenciar cualitativamente dos fases: una en la que *r* es pequeño y el estado de equilibrio se compone mayoritariamente por números compuestos no divisibles entre sí; y otra donde $r = 1$ y en la que todos los números del estado final son primos. Llamaremos a la primera fase «desordenada», y a la segunda, «ordenada».

Nótese que ambas fases corresponden a valores menores y mayores de *N*, respectivamente. Este resultado puede entenderse con facilidad: cuando *N* es pequeño, la probabilidad de que dos números escogidos al azar reaccionen será baja, por lo que llegaremos con rapidez a un punto muerto en el que apenas se habrán generado primos que no estuvieran ya en el estado inicial. En cambio, cuando *N* es grande, la probabilidad de catálisis aumenta, lo que produce continuamente nuevos números hasta que todos son primos y cesa la actividad. Así pues, parece que variando *N* podemos hacer que nuestro gas cambie de una fase a otra.

Todas estas características son típicas de las transiciones de fase orden-desorden de la mecánica estadística. ¿Habremos descubierto una transición quiritmética?



3. CURVA UNIVERSAL: Valor de P_M frente a $N/N_C \sim N(\log M/M)^{\alpha}$. Puede comprobarse que todas las curvas de la figura 2 convergen a una sola; una vez más, se trata de un comportamiento que imita el de las transiciones de fase en numerosos sistemas físicos.

Transiciones de fase

La mecánica estadística describe la manera en que, al aumentar la temperatura T un material ferromagnético, este pasa de estar magnetizado (cuando la magnetización m cumple $m \neq 0$) a otro en el que la magnetización es nula ($m = 0$). Cuando la temperatura es baja, los momentos magnéticos de los átomos tienden a alinearse en una misma dirección, lo que da lugar a una magnetización global. Pero, al aumentar la temperatura, la mayor energía térmica hace que los momentos magnéticos atómicos se orienten de forma aleatoria, o desordenada, lo que causará que el sistema total deje de estar magnetizado.

Decimos que la magnetización actúa como «parámetro de orden», ya que su valor ($m = 0$ o $m \neq 0$) nos permite distinguir entre las fases. Por su parte, T opera como «parámetro de control», ya que al variarlo podemos cambiar de fase. Su valor crítico, T_C, corresponde al que separa ambas fases.

En nuestro gas de números parece que r actúa como parámetro de orden y N como parámetro de control. Sin embargo, la figura 1 pone de manifiesto que, en la fase desordenada, nuestro parámetro de orden r no se anula, como suele ocurrir en mecánica estadística.

El motivo resulta fácil de entender. Un célebre resultado de la quiritmética, conocido como teorema de los números primos, nos dice que la cantidad de números primos contenidos en los M primeros números naturales (cuando $M \gg 1$) es aproximadamente igual a $M/\log M$. Por tanto, el mero hecho de escoger N números al azar de $C(M)$ nos asegura una probabilidad no nula de tener desde el principio algunos números primos, los cuales no cambiarán bajo las reacciones quiritméticas.

Podemos intentar arreglar este contratiempo con un nuevo parámetro de orden. Para ello usaremos $P_M(N)$, definido como la probabilidad de que nuestro gas inicial alcance el estado ordenado con $r = 1$.

En la práctica, podemos computar $P_M(N)$ de la siguiente manera: para cada ejecución del experimento, una vez que se ha alcanzado el estado estacionario verificamos si $r = 1$; es decir, si los números finales son todos primos o no. La fracción de las veces que eso ocurra nos proporcionará la determinación experimental de $P_M(N)$. La figura 2 muestra los resultados. Vemos que ahora nuestro parámetro de orden sí que se anula en la fase desordenada, como cabe esperar.

Sistema crítico

Llegados aquí, podemos definir el valor crítico N_C del parámetro de control (equivalente a la temperatura crítica T_C) como aquel donde $P_M(N)$ deja de valer cero.

Como podemos ver en la figura 2, $N_C(M)$ crece con M. Pero ¿cómo es esa dependencia? Podemos aproximarnos a la cuestión suponiendo que, a cada paso de tiempo, generamos N moléculas de manera aleatoria y no mediante reacciones. Este truco permite que nos deshagamos de las correlaciones entre números que introducen las reacciones, las cuales resultan intratables matemáticamente. Puede demostrarse que, en este caso, existe una relación de escala entre N_C y M:

$$N_C(M) \sim (M/\log M)^{\alpha}.$$

Para comprobar si esta relación se sigue cumpliendo en nuestro gas cuando no pasamos por alto las correlaciones, en la figura 2 hemos incluido los valores de $N_C(M)$ obtenidos experimentalmente en función de $M/\log M$. El ajuste con $\alpha = 0{,}59$ (que obviamente no coincide con el valor de α del caso aleatorio) es excelente.

En las transiciones de fase orden-desorden, el valor crítico del parámetro de control suele crecer como una potencia del tamaño característico del sistema. Ello sugiere que, en nuestro caso, ese tamaño característico no es M, como podríamos pensar en un principio, sino $M/\log M$. Esto parece razonable si recordamos que el número aproximado de primos que nos encontraremos en el conjunto $C(M)$ es, precisamente, $M/\log M$.

A partir de este resultado, y siguiendo las recetas habituales de las transiciones orden-desorden de la mecánica estadística, deberíamos poder colapsar todas las curvas $P_M(N)$ de la figura 2 en una única curva universal. En la figura 3 vemos la representación de $P_M(N)$ frente al parámetro de control normalizado por el valor crítico, $N/N_C \sim N(\log M/M)^{\alpha}$. Podemos comprobar que, en efecto, todas las curvas convergen a una sola.

No sé si, como confiesa sentir el escritor Karl Sabbagh en la entradilla de esta columna, podemos tocar los números primos como si estuvieran hechos de materia física. Pero no me digan que no es sorprendente e intrigante que en la quiritmética seamos capaces de encontrar transiciones de fase como las que se producen en los sistemas químicos y físicos de nuestro mundo material.

PARA SABER MÁS

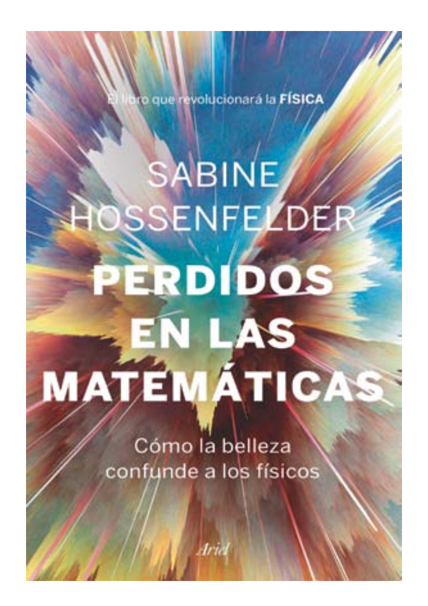
Artificial chemistries: A review. Peter Dittrich, Jens Ziegler y Wolfgang Banzhaf en *Artificial Life*, vol. 7, págs. 225–275, verano de 2001.

Phase transition in a stochastic prime number generator. Bartolo Luque, Lucas Lacasa y Octavio Miramontes en *Physical Review E*, vol. 76, art. 010103(R), julio de 2007.

Phase transition and computational complexity in a stochastic prime number generator. Lucas Lacasa, Bartolo Luque y Octavio Miramontes en *New Journal of Physics*, vol. 10, art. 023009, febrero de 2008.

EN NUESTRO ARCHIVO

Ladrillos, candados y progresiones. Agustín Rayo en *IyC*, febrero de 2010.



PERDIDOS EN LAS MATEMÁTICAS
CÓMO LA BELLEZA CONFUNDE A LOS FÍSICOS
Sabine Hossenfelder
Ariel, 2019

¿Han perdido el norte los físicos teóricos?

Un análisis crítico del papel de la estética en la búsqueda de las leyes fundamentales de la naturaleza

A principios del siglo pasado, dos nuevas teorías irrumpieron y transformaron el panorama de la física: la mecánica cuántica y la relatividad. Los años que siguieron vieron sus éxitos predictivos y su afianzamiento como marcos teóricos fundamentales. Gracias al acceso a niveles de energía cada vez más elevados, tuvo lugar el descubrimiento de un gran número de partículas elementales. Ordenar estos componentes de la materia y explicar su existencia e interacciones se hizo apremiante. Ello se logró, finalmente, en el contexto de la teoría cuántica de campos, y culminó con el establecimiento del modelo estándar de la física de partículas. Los argumentos basados en criterios de simetría desempeñaron un papel central en todo ese desarrollo, así como habían sido también esenciales en la formulación de las teorías de la relatividad. No hace mucho hemos presenciado el último de los grandes éxitos del modelo estándar, estrechamente vinculado con la noción de simetría: la detección del bosón de Higgs.

A pesar de su brillante historia reciente, en las últimas décadas la física teórica parece haberse estancado. El consenso es que necesitamos nueva física, más allá del modelo estándar, para afrontar problemas como los de la materia y la energía oscuras, la constante cosmológica o la gravitación cuántica. Los físicos llevan años formulando modelos teóricos, pero cada vez resulta más difícil contrastarlos empíricamente; en gran medida, porque para ello se requeriría alcanzar energías muy alejadas de las posibilidades técnicas. Esto ha causado que, para la elaboración y la evaluación de nuevas teorías, se recurra de manera creciente a los mismos criterios no empíricos que tan buenos resultados dieron en el siglo xx: criterios relacionados con la simetría, la simplicidad y la belleza formal de las teorías. Sin embargo, esta vez los éxitos están tardando en llegar y las propuestas parecen cada vez más especulativas. ¿Han perdido el norte los físicos teóricos?

> Cuando el acceso a los datos es muy limitado, se necesitan criterios fiables que orienten la formulación de teorías

Esta es la situación que aborda el libro *Perdidos en las matemáticas*, de Sabine Hossenfelder. El hilo conductor que lo vertebra es, precisamente, la cuestión de la confianza, tal vez excesiva, en criterios de carácter estético que parece imperar en la física teórica actual y que, según la autora, quizás haya desviado a los físicos del buen camino. La fascinación que estos sienten por la belleza matemática de sus teorías podría estar impidiendo que la física salga de su actual atolladero.

El libro contiene al menos la semilla de tres posibles obras. La primera, una monografía sobre el lugar que ocupan ciertos valores no estrictamente epistémicos y aparentemente relacionados con los juicios estéticos en la elaboración y la evaluación de las teorías físicas. La segunda, un estudio histórico-sociológico del estado actual de una disciplina tan influyente en nuestro tiempo como la física teórica, que incluye valiosas entrevistas de la autora con relevantes físicos contemporáneos. Y por último, un relato en primera persona de las esperanzas y decepciones de una investigadora de la disciplina. Las tres obras, a mi entender, quedan en cierto modo incompletas. No obstante, los esbozos que encontramos son en sí mismos interesantes y hacen que su lectura sea recomendable para cualquiera interesado en los caminos que ha tomado la física teórica en las últimas décadas y los que se abren para su desarrollo futuro.

Como señalaba al principio, los argumentos basados en criterios de belleza matemática —más específicamente, en ciertos principios de simetría— moldearon gran parte de la física del siglo xx, desde la relatividad a la física de partículas o la teoría cuántica de campos, y se mostraron altamente fructíferos. En las últimas décadas, no obstante, argumentos análogos parecen llevar a callejones sin salida. El libro de Hossenfelder puede leerse, en parte, como una búsqueda de los motivos que han llevado a esta situación y como una reflexión, a veces ingenua y otras lúcida, sobre el valor de ciertos rasgos de las teorías físicas que no son reducibles a la mera adecuación empírica.

La posición de la autora es, al menos de principio, escéptica con respecto a la eficacia de tales criterios no empíricos. Su posición parece ser que están ahí y son inevitables, pero que solo poseen valor subjetivo y constituyen sesgos que pueden dificultar el conocimiento. A la realidad no le importa qué es lo que nos gusta o nos parece elegante. Y como bien se señala en el libro, en la historia de la física encontramos bellas teorías que fueron descartadas por su incompatibilidad con los datos empíricos, así como otras que en sus orígenes fueron consideradas poco atractivas pero que resultaron muy eficaces. Ni las ideas de belleza aplicadas a la ciencia son las mismas para todos ni parecen infalibles. Aun así, y ese es el problema que señala la autora, algunas

nociones estéticas parecen orientar gran parte de la investigación presente.

¿De qué estamos hablando cuando hacemos referencia a criterios estéticos? Hossenfelder considera distintas nociones que usan los físicos cuando valoran las teorías. Estas incluyen algunas que asociamos explícitamente con la estética, como la belleza, la armonía y la elegancia; y otras que, sin ser específicamente estéticas, parecen remitir a dicho ámbito de la experiencia humana, como la naturalidad, la unificación, la simetría o la simplicidad.

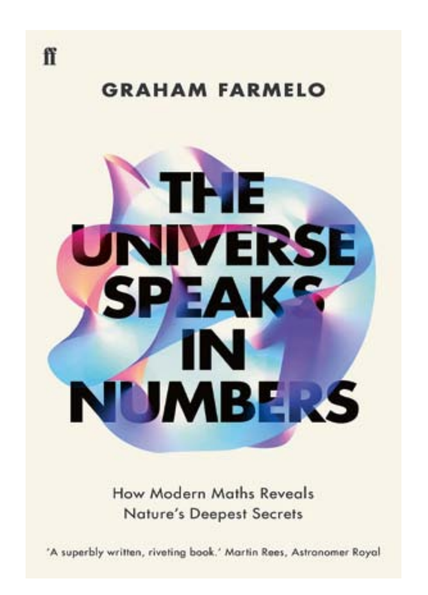
Considero que la diferencia es importante y quizá no está lo suficientemente delimitada en el texto. Lo es porque, si bien resulta cuestionable que las preferencias estéticas de los físicos sirvan de guía para encontrar teorías físicas que en el futuro demuestren ser adecuadas empíricamente, eso no significa que algunas de esas nociones no puedan ser formalizadas, conectadas con propiedades epistémicas y que terminen revelándose como inherentes al procedimiento de contrastación empírica. Ejemplos de ello pudieran ser las categorías de naturalidad (explicada por la autora de forma clara para no especialistas, y que puede entenderse como la insensibilidad de las teorías emergentes ante las variaciones de ciertos parámetros de las teorías fundamentales) o de simetría (que ha sido vinculada por distintos autores a criterios de objetividad).

Aunque a menudo los físicos manifiesten su preferencia por estos rasgos remitiendo a su gusto por ciertos tipos de números o estructuras, eso no indica que estos no escondan criterios epistémicamente relevantes. Una discusión más pormenorizada de este aspecto requeriría una crítica a la concepción, quizá demasiado simplista, de la evaluación empírica de las teorías y del método científico que la autora parece adoptar, algo que no encontramos en el libro [*véase* «Los límites del método científico», por Adán Sus; Investigación y Ciencia, abril de 2016].

Dicho esto, hay que recalcar que el objetivo de la obra no es ofrecer un análisis conceptual de dicho problema. A pesar de ello, proporciona un aliciente para indagar en la tensión entre los criterios de adecuación empírica y otros de carácter estético, y deja claro que abordar esta cuestión resulta ahora más necesario que nunca. En una situación en la que el acceso a los datos es muy limitado, los físicos necesitan criterios fiables que orienten la formulación de teorías. Y, al menos aquellos con una orientación más filosófica, desearán comprender qué hace que tales criterios resulten eficaces.

En la descripción de esta situación de perplejidad, llevada a cabo a partir de entrevistas a físicos de primer nivel, como Nima Arkani-Hamed, Steven Weinberg o George Ellis, es donde el libro funciona mejor. Nos muestra cómo investigadores que han invertido gran parte de su carrera en programas como la supersimetría o la teoría de cuerdas afrontan la persistente carencia de datos con los que contrastar sus teorías, o de qué manera defienden o critican propuestas tan controvertidas como la del multiverso. Y, detrás de los argumentos, se vislumbra el carácter de las personas que dedican su vida a descifrar los misterios del universo. ¿Cómo no encontrar belleza en eso?

—Adán Sus
Departamento de Filosofía
Universidad de Valladolid



THE UNIVERSE SPEAKS IN NUMBERS
HOW MODERN MATHS REVEALS NATURE'S DEEPEST SECRETS

Graham Farmelo
Faber & Faber, 2019

El alma de la física teórica

Una respuesta al argumento de que la belleza está confundiendo a los físicos

Las matemáticas constituyen una herramienta de enorme potencia para entender las leyes del universo, como demostró de manera espectacular (por ejemplo) el descubrimiento en 2012 del bosón de Higgs, predicho en los años sesenta del siglo pasado. Sin embargo, un permanente y apasionado debate sobre el rumbo de la física teórica se pregunta por el vínculo entre la física y las matemáticas y, en particular, por si estas últimas no se habrán vuelto demasiado dominantes en dicha relación.

El temor, expresado por diferentes autores a lo largo de varias décadas, es que la física teórica se haya convertido en un monocultivo demasiado centrado en un pequeño conjunto de conceptos y planteamientos. Entre ellos se encontrarían la teoría de cuerdas, las predicciones exageradas de nuevos descubrimientos, la excesiva confianza en la elegancia matemática como guía, así como una tendencia a lo que el físico y escritor Jim Baggott, en su libro *Farewell to reality* (2013), denominó «física de cuento de hadas», separada de su base empírica. Algunas críticas notables provienen de físicos teóricos como Peter Woit, Lee Smolin y, más recientemente, Sabine Hossenfelder (*véase la reseña anterior*). En este contexto, no cabe duda de que Graham Farmelo ha planteado *The universe speaks in numbers* («El universo habla con números») a modo de réplica.

El libro de Farmelo nos invita a recorrer la historia del campo. Sus principales protagonistas son James Clerk Maxwell, Albert Einstein y Paul Dirac (quien fuera objeto de la excelente biografía *The strangest man*, publicada por Farmelo en 2009). La unificación de la electricidad, el magnetismo y la luz en las ecuaciones de Maxwell es uno de los puntos álgidos de toda titulación decente en física. Supongo que la mayoría de los fí-

sicos podrán recordar el momento en que, tras algunos trucos algebraicos con las corrientes y los voltajes, se les apareció como por arte de magia la velocidad de la luz. El universo no solo habla con números: también canta y baila.

La constancia de la velocidad de la luz condujo a la teoría especial de la relatividad, formulada por Albert Einstein en 1905. A partir de ella, en un salto conceptual sorprendente —e impulsado por las matemáticas—, Einstein concibió en 1915 la relatividad general, y con ella la curvatura del espaciotiempo y las ondas gravitacionales, descubiertas cien años después en el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO). Y en 1928, Dirac, al exigir la coherencia matemática de la mecánica cuántica y la relatividad especial, permitió comprender el espín del electrón —sin el cual la tabla periódica de los elementos no tendría sentido— y predijo la existencia de la antimateria, descubierta asimismo pocos años después.

Estos son algunos grandes éxitos del enfoque matemático, y Farmelo nos guía hábilmente a través de ellos mediante una mezcla de historias contemporáneas e ideas científicas. Sin embargo, también arroja una mirada escéptica a lo que los protagonistas cuentan sobre sí mismos, y es aquí donde comienzan a notarse las tensiones. Consideremos la advertencia que hizo Einstein a quienes quisieran aprender sobre los métodos de los físicos teóricos: «No escuchen sus palabras, fíjense en sus actos». Como relata Farmelo, algunos estudios de los escritos de Einstein han ofrecido un contexto interesante para esta frase, ya que muestran cómo, más tarde, él mismo exageró el papel que desempeñaron las matemáticas en sus descubrimientos y restó importancia a la percepción física.

Las matemáticas y la física trabajan juntas de manera eficaz y en beneficio de ambas

El argumento de Farmelo es que las matemáticas y la física trabajan juntas de manera eficaz y en beneficio de ambas. Dirac y Einstein fueron paladines de la física gobernada por las matemáticas. No obstante, sus alegatos fueron más o menos ignorados por sus colegas más jóvenes, como Richard Feynman y Steven Weinberg, quienes estaban desarrollando el modelo estándar de la física de partículas. Durante lo que Farmelo llama «el largo divorcio» de las matemáticas y la física teórica, entre los años treinta y setenta del siglo pasado, se forjó nuestra comprensión actual de la física fundamental. Dirac y Einstein apenas participaron en esos avances.

Así pues, el período más fructífero en el desarrollo de la física de partículas coincidió con su alejamiento de las matemáticas puras. Podría parecer que esto socava el argumento de Farmelo; sin embargo, es probable que aquel progreso tuviera más que ver con los rápidos avances experimentales de la época que

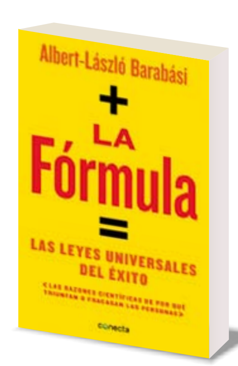
NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



ADAPTARSE O MORIR
LOS SECRETOS DE LA NATURALEZA PARA SOBREVIVIR EN EL MUNDO ANIMAL

Evelyn Segura
Paidós, 2019
ISBN: 978-84-493-3567-9
280 págs. (16,95 €)



LA FÓRMULA
LAS LEYES UNIVERSALES DEL ÉXITO

Albert-Lázsló Barabási
Conecta, 2019
ISBN: 9788416883295
304 págs. (19,90 €)

EN EL FUTURO
PERSPECTIVAS PARA LA HUMANIDAD

Martin Rees
Crítica, 2019
ISBN: 978-84-9199-102-1
216 págs. (18,90 €)



CIENCIA, Y UN GRAN PASO PARA LA HUMANIDAD

Varios autores
Prólogo de Michael López-Alegría
Editado por Ana S. Casalvilla Dueñas y Quintín Garrido Garrido, 2019
368 págs.
Disponible gratuitamente en cienciayungranpasoparalahumanidad.blogspot.com



con cualquier problema intrínseco en la relación entre ambas disciplinas.

Aquella fue una etapa fértil para la experimentación y con constantes resultados nuevos y sorprendentes, desde el hallazgo del muon hasta el descubrimiento de la estructura interna del protón. Tales resultados exigían ser explicados. Aunque los pocos físicos matemáticos que trabajaban en el campo, en particular Freeman Dyson, lograron importantes contribuciones, la mayoría no necesitó ir más allá de las técnicas matemáticas ya consolidadas. El propio Dyson, citado por Farmelo, sostiene: «No necesitábamos ayuda de los matemáticos. Nos creíamos muy inteligentes y pensábamos que podíamos hacerlo mejor por nuestra cuenta». Y, como señala el propio Farmelo, aquel sentimiento era mutuo: «[Los físicos] rara vez generaban ideas que tuvieran el más mínimo interés para los matemáticos». A ambos lados del divorcio, muchos se mostraban conformes con aquella situación.

Pero en los años ochenta comenzó a tener lugar un reencuentro. Por un lado, la mayoría de los físicos de partículas se dedicaron a calcular y a confirmar todo tipo de resultados que establecieron que el modelo estándar era, como poco, una «teoría efectiva» sorprendentemente precisa. Y otros, liderados por celebridades como Michael Atiyah, Edward Witten y algunos pioneros de la teoría de cuerdas, como Michael Green y John Schwarz, se dedicaron a explorar sus límites matemáticos.

Buena parte del debate actual cuestiona si aquel enfoque matemático acabó tornándose demasiado dominante y acaparando un excesivo reconocimiento académico y financiación. En este sentido, Farmelo ofrece una amena descripción del toma y daca propio de cualquier área interdisciplinar próspera, en la que los problemas físicos estimularon avances matemáticos y donde las matemáticas proporcionaron nuevas ideas y técnicas a la física. Farmelo evita discutir el «paisaje» de la teoría de cuerdas, el inabarcable conjunto de posibles teorías físicas al que parece haber conducido el enfoque matemático y que mina las esperanzas de formular una única «teoría del todo» [*véase* «Multiverso: ¿Fantasía científica o necesidad teórica?» VV.AA.; colección *Temas de IyC* n.º 93, 2018]. En su lugar, se concentra en desarrollos con aplicaciones físicas más directas y fáciles de verificar, en los que esa complejidad matemática ha comenzado a repercutir en una mayor comprensión del modelo estándar.

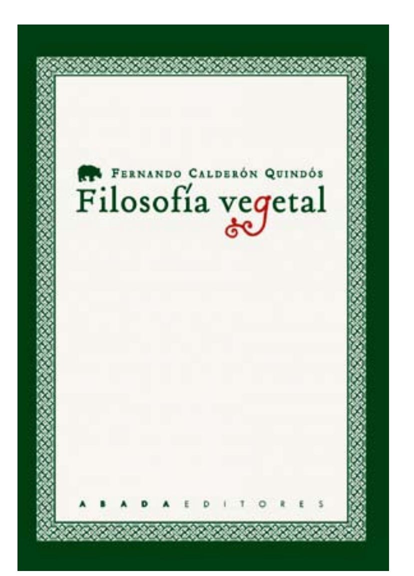
El modelo estándar es una estructura teórica compleja, sutil y tremendamente exitosa que deja importantes preguntas sin responder. Farmelo defiende de manera convincente que las matemáticas desempeñan un papel clave a la hora de abordarlas. Sin embargo, sospecho que la cuestión de si la física teórica se ha enamorado demasiado de la belleza de las matemáticas seguirá siendo objeto de acalorados debates.

La larga búsqueda experimental que condujo al hallazgo del bosón de Higgs vino motivada porque, antes de aceptar la existencia de un campo cuántico de energía que llena todo el universo (una de las consecuencias de la teoría que predijo la partícula), los físicos exigieron pruebas que fuesen más allá de «las matemáticas funcionan». Esa necesidad de confirmación experimental es aún mayor cuando el argumento es «las matemáticas son hermosas». Puede que el universo hable con números, pero usa datos empíricos para hacerlo.

—Jon Butterworth
Departamento de Física y Astronomía
Colegio Universitario de Londres

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 568, págs. 309-311, 18 de abril de 2019.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2019

Con la colaboración de nature



FILOSOFÍA VEGETAL
CUATRO ESTUDIOS SOBRE FILOSOFÍA E HISTORIA NATURAL
Fernando Calderón Quindós
Abada, 2018

La botánica y la consolidación de la ciencia moderna

De cómo la botánica de la Ilustración puso en marcha los principios del empirismo en el estudio del mundo natural

Como bien sabe todo lector interesado en la historia de la ciencia, no es tarea sencilla determinar cuándo y dónde nació el pensamiento científico. Las interpretaciones que ofrecen los historiadores varían de manera considerable y, dependiendo de si la definición que usemos de ciencia pone su énfasis en la metodología, los descubrimientos, los resultados prácticos, las personas dedicadas a la investigación o la existencia de una comunidad amplia de expertos, es posible defender diferentes versiones de su origen histórico. Así, mientras que algunos afirman que la ciencia nació en la Antigüedad clásica con ilustres antepasados como Eratóstenes o Herón de Alejandría, o en la Edad Media con sabios como Roger Bacon, otros sitúan el inicio de la ciencia en el Renacimiento o ya en la Modernidad de los siglos XVI y XVII, con Copérnico, Kepler y Galileo.

En cambio, lo que no ofrece duda es que fue la Ilustración del siglo XVIII la que otorgó a la ciencia su mayoría de edad. Y que fue en este periodo cuando la ciencia moderna terminó de establecer su método de investigación, su lenguaje técnico, sus sistemas de clasificación y su dedicación a la experimentación y al rigor de la comprobación empírica. Pero, sobre todo, fue el Siglo de las Luces el que vio nacer un fenómeno social completamente nuevo y

sin antecedente en otras épocas o culturas: la fascinación popular por la ciencia. En efecto, por primera vez en la historia, la ciencia dejó de ser el reducto de un puñado de sabios desconectados del resto de la sociedad para convertirse en patrimonio común de la burguesía ilustrada europea y, en general, occidental, cuya imaginación fue atrapada por las maravillas sobre el mundo natural que la ciencia moderna descubría a un ritmo vertiginoso.

En todo lo anterior la botánica desempeñó un papel estelar: tanto en el desarrollo de la metodología moderna de estudio y clasificación de los seres vivos, como en la divulgación de ese conocimiento a través de la didáctica de los principios de la ciencia como saber práctico que toda persona educada podía llegar a dominar sin necesidad de ser un científico profesional. En el siglo previo, la atención de los científicos se había dirigido sobre todo a la observación de los cuerpos celestes y a la teorización sobre las leyes de su movimiento. Los avances en los instrumentos ópticos, particularmente el telescopio, abrieron camino al protagonismo de astrónomos y cosmógrafos como vanguardia de una ciencia racionalista y teórica. En el siglo XVIII, en cambio, la ciencia se volcó en el estudio del mundo natural que nos rodea, y desarrolló sus métodos de acuerdo con las ideas de la filosofía empirista que tan decididamente marcaron el espíritu de la Ilustración. Ello abrió el camino para que la botánica se convirtiera en la ciencia más claramente identificada en el Siglo de las Luces con el ideal empirista de ciencia natural.

La relación de los estudios botánicos del siglo XVIII con la filosofía, el arte, el lenguaje, la construcción de la ciencia moderna e incluso con la moral y la educación didáctica es justamente el tema que aborda, con notable maestría narrativa, Fernando Calderón en un libro de título evocador, *Filosofía vegetal*, y subtítulo más bien descriptivo: *Cuatro estudios sobre filosofía e historia natural*. Los cuatro ensayos que componen esta obra dibujan un retrato fascinante y ameno sobre el esfuerzo emprendido por los naturalistas del siglo XVIII para transformar el estudio de las plantas —hasta entonces una abigarrada colección de conocimientos anecdóticos, mitos y recetas farmacéuticas formada por miles de nombres variopintos y de uso local— en una verdadera ciencia moderna. Una fundamentada empíricamente y consolidada en un nuevo lenguaje científico, preciso y de alcance universal, con aspiraciones legítimas de formar un cuerpo de conocimientos definitivo sobre el mundo natural.

El primer ensayo, titulado «Botánica y lenguaje: Ciencia de nombres y de plantas», narra el camino que siguió la ciencia para encontrar un lenguaje práctico, preciso y fácil de aplicar. El objetivo era que toda la comunidad científica, en cualquier parte del mundo, pudiera nombrar, clasificar y describir de manera uniforme cada nueva especie que se fuese descubriendo. La culminación de este esfuerzo, no exento de críticas y polémica, llegó con la adopción del sistema de nomenclatura binomial de Linneo.

En el siglo XVIII, la botánica se convirtió en la ciencia más identificada con el ideal empirista de ciencia natural

En «El herbario y el dibujo: Dos formas de representación de la naturaleza vegetal» Calderón describe el mundo del coleccionismo de ejemplares originales, debidamente secados y montados, como un medio adecuado para permitir la clasificación taxonómica por parte de los científicos, pero no para reproducir la esencial belleza de las plantas y flores vivas. También relata la animada polémica desatada entre la comunidad de botánicos ante la pretensión del arte naturalista —cada vez más preciso, realista y detallado— de superar la «veracidad» de las mismas plantas de un herbario y obrar como documento de la realidad del mundo natural.

En «Botánica sin maestro: De las *Lettres sur la botanique* de Jean-Jacques Rousseau a las obras elementales para uso de mujeres», el autor analiza la popularización de la botánica como una ciencia rigurosa pero a la vez amable, que debería ser conocida y estudiada por toda persona educada y culta y, sobre todo, ideal para introducir a las mujeres en el mundo de la ciencia, de acuerdo con el espíritu filantrópico y educativo de la Ilustración.

Por último, en «El descubrimiento de la montaña: de Thomas Burnet a Horace-Bénédict de Saussure», Calderón describe el peculiar camino que siguió la interpretación estética y moral de la montaña: de ser tenida como un lugar de esterilidad malévola en la Edad Media, al descubrimiento de su belleza sublime en el Romanticismo, convertida en símbolo supremo de la pasión por la naturaleza del Siglo de las Luces.

No es frecuente que las obras divulgativas que reconstruyen la historia de las ciencias se tomen el trabajo de explorar, paralelamente a la relación de los descubrimientos y sus efectos más significativos para el avance del conocimiento, la historia de las dudas, las polémicas o los cuestionamientos —a veces surgidos desde el simple sentido común— que acompañaron al nacimiento e instauración de teorías científicas que hoy, por simple familiaridad, nos parecen incuestionables. Pero justamente eso es lo que hace, con muy buen tino, la presente obra. Su principal mérito es saber mostrar el amplio proceso social, y no solo el estrictamente científico, por el que la botánica se convirtió en el vehículo perfecto para la popularización de la ciencia durante la Ilustración, así como en un símbolo poderoso de la unión entre razón y naturaleza, un tema favorito del espíritu ilustrado de la época. La gran virtud de *Filosofía vegetal* es saber explorar las diversas y ricas relaciones de la botánica con el arte o con la filosofía empirista del siglo XVIII, sin por ello descuidar el rigor de los datos científicos, así como mostrar, con gran viveza, el carácter contingente del camino por el que se abrieron paso las ciencias naturales en esta época. A modo de ejemplo, baste recordar que el sistema de nomenclatura binomial fue originalmente solo uno de los varios propuestos para la clasificación del mundo natural, y que perfectamente hubiera podido acabar siendo sustituido por cualquier otro.

Fernando Calderón, profesor de filosofía centrado en el estudio del pensamiento del siglo XVIII, consigue con esta amena y documentada obra iluminar uno de los momentos decisivos de la historia de la ciencia. Aquel en el que, a través del estudio de las plantas, se impuso la filosofía empírica como guía para la exploración sistemática del mundo natural.

—Jorge Roaro
Editor de la revista electrónica de filosofía Disputatio

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

JUNIO

1969

Aguas saludables para el corazón

«Varios estudios de la década pasada sugerían que la mortalidad por enfermedad coronaria estaba inversamente relacionada con la dureza del agua de la red local: a mayor dureza, menor mortalidad. Un estudio reciente publicado en el *New England Journal of Medicine* aporta pruebas de que casi todos los fallecimientos coronarios de más que se producen en las regiones de aguas blandas corresponden a muertes súbitas fuera del hospital. Investigadores del Departamento de Higiene de la Universidad de Toronto revisaron 55.000 certificados de defunción registrados en la provincia de Ontario en 1967 y los clasificaron según la dureza del agua local que consumía cada fallecido.»

Las causas de la relación siguen sin conocerse: las últimas teorías implican al magnesio y al calcio.

Vacuna contra la rubeola

«Es probable que en cuestión de semanas se autoricen en EE.UU. las vacunas que han inmunizado frente a la rubeola a casi el 95 por ciento de las personas en las que se ensayaron. La inmunización generalizada mediante estas vacunas podría prevenir la oleada de contagios que se predice para principios de 1970, como la que se extendió por EE.UU. en 1964, que produjo al menos 8000 muertes fetales y causó sordera, enfermedad coronaria, cataratas, glaucoma, retraso psicomotor y trastornos sanguíneos a entre 15.000 y 20.000 niños de corta edad.»



1969



1919



1869

1919

Vuelo transatlántico

«Al buscar en la historia de todas las artes y las ciencias, no hallaremos nada que haya sido tan maravilloso y heroico como la más reciente de todas ellas: el arte de volar, esa asombrosa criatura del siglo XX. Un ave terrestre, desdeñando su medio natural, había cruzado el Atlántico desde Terranova hasta la costa de Irlanda en un vuelo libre que duró dieciséis horas y media. El bombardero *Vickers-Vimy*, que llevó al capitán Alcock en su increíble esprint, fue construido para bombardear Berlín. El aterrizaje se produjo a pocos kilómetros del lugar elegido por el navegante Brown. Así que esos arrojados jóvenes, que habían almorzado en América, desayunaron al día siguiente en Europa.»

Avances muy lentos

«Otra de las más importantes sociedades científicas de Gran Bretaña, la Sociedad Geográfica, ha decidido admitir a mujeres como miembros. La institución había considerado esa medida en tres ocasiones anteriores con resultados negativos.»



Ciclismo circular

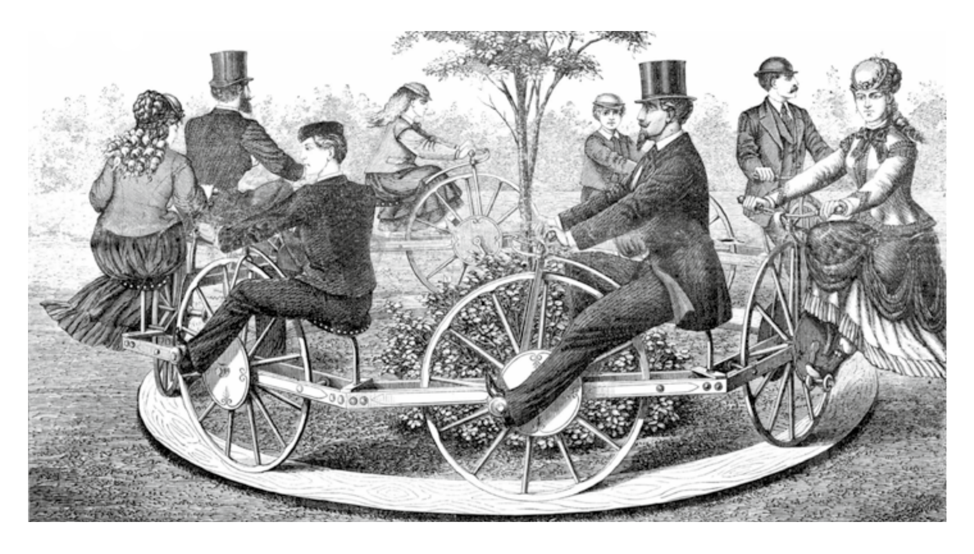
«Se muestra en nuestro grabado un velocípedo adaptado al uso de todos, viejos y jóvenes, grandes y pequeños de ambos sexos, hábiles o torpes, en el cual la compañía acentúa el placer del ejercicio. Nuestro artista ha representado muy bien el funcionamiento y los detalles del invento. Esta máquina se ha diseñado para su uso en espacios de recreo privados y públicos o para su alquiler por horas en grandes ferias. Sienta bien al corazón, afirma nuestro entusiasta informante, oír los gritos de sana alegría de nuestros hijos cuando se alcanza la máxima velocidad.»

Tormenta magnética

«En el atardecer del 15 de abril, sobre toda la zona norte del país se desató una tormenta magnética de inusitada intensidad, la cual afectó tan gravemente al funcionamiento del telégrafo que, en algunos circuitos, solo pudo trabajarse desconectando las baterías y sustituyéndolas por la corriente auroral. El efecto de esa gran perturbación del magnetismo terrestre se manifestó con especial potencia en los tendidos entre Nueva York y Boston, y durante varias horas el funcionamiento de las líneas de esa ruta dependió por completo de esa anómala fuente de energía.»

Papel para la nariz

«Según el *Boston Journal of Chemistry*, los dignatarios japoneses que recientemente visitaron este país bajo la dirección del señor Burlingame, utilizaban papel en vez de pañuelos de bolsillo siempre que era ocasión de quitarse el sudor de la frente o de sonarse. Nunca usaban la misma pieza dos veces, sino que la tiraban después de haberla tenido primero en las manos. Suponemos que en épocas de muchos catarros todo el Imperio japonés se cubrirá de pequeños papeles que revolotearán con el viento. Es un papel blando, fino y muy fuerte.»



1869: Precursores del *spinning* (con montura de amazona para las damas).

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XX, N.º 23, 12 DE JUNIO DE 1869



INFORME ESPECIAL

50 AÑOS DE LA LLEGADA A LA LUNA

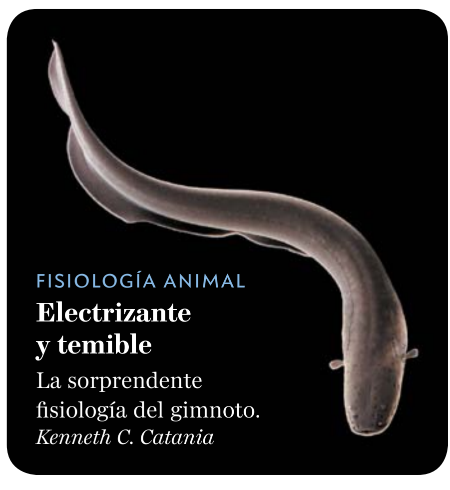
La misión del *Apolo 11* paso a paso
Eduardo García Llama

Las rocas que transformaron nuestra comprensión del sistema solar
Erica Jawin

Disputa por los terrenos lunares
Adam Mann

La clave para resolver el origen de la Luna
Simon Lock y Sarah Stewart

Entrevista con Jan Wörner, director general de la ESA, sobre el proyecto de la aldea lunar
Clara Moskowitz



FISIOLOGÍA ANIMAL

Electrizante y temible

La sorprendente fisiología del gimnoto.
Kenneth C. Catania



SALUD PÚBLICA

El caos del dengue

¿Se debe el peligro de una vacuna contra el dengue a la existencia de una reacción inmunitaria descontrolada?
Seema Yasmin y Madhusree Mukerjee

SOSTENIBILIDAD

Ciudades esponja

El restablecimiento de corrientes naturales de agua en las ciudades puede reducir el impacto de inundaciones y sequías.
Erica Gies

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE
Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Andrés Martínez: *Apuntes*; Javier Grande: *Apuntes, Gravedad cuántica en el laboratorio, Volcanes diminutos en la playa y El alma de la física teórica*; Lorenzo Gallego: *Recuperación cerebral tras la muerte*; José Óscar Hernández Sendín: *Enjambres robóticos inspirados en la biología y La máquina que lee las intenciones*; Miguel A. Vázquez Mozo: *La tabla periódica: una obra inacabada y Rescatar la gravedad*; Ana Mozo García: *Regeneración de órganos con fármacos*; Xavier Roqué: *El estado sólido y el nuevo mapa de la física*; Fabio Teixidó: *Terremotos en el cielo*; Mercè Piqueras: *Simbiosis microbianas*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocobrhi - Ronda de Valdecarrizo, 13
28760 Tres Cantos (Madrid)

Printed in Spain - Impreso en España